

Aus der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. Dr. Michael Ehrenfeld

**Bony interface zwischen lateralen gelenktragenden und medialen
Segmenten bei Vor- oder Rückverlagerungen des Unterkiefers nach
bilateraler sagittaler Spaltungsosteotomie im Ramusbereich –
Verhalten und Kontrollmöglichkeiten im Modellversuch**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Adrian Dieter Weingart

aus
Münster

2020

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Carl-Peter Cornelius

Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. dent. Andrea Wichelhaus
Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Christof Holberg

Mitbetreuung durch die
promovierten Mitarbeiter: PD Dr. med. Dr. med. dent. Florian Probst
Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Sven Otto

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 12.11.2020

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung:	6
1.1 Die sagittale Spaltung im Unterkiefer	6
1.2 Positionierung der Gelenkköpfe	9
1.3 Planung von Umstellungsosteotomien	15
1.3.1 Planung im Artikulator mit Gipsmodellen	15
1.3.1 Virtuelle Planung von Umstellungsosteotomien	18
1.3.2 Digitale Planung in der MKG Chirurgie der LMU München	19
1.4 Ziel der Arbeit	20
2. Material und Methode:	22
2.1 Fallbasierte Modelle	22
2.2 Stereolithographiemodelle	23
2.3 Simulation im 3D Orthognathic Surgery Simulator - Fotoserien	24
2.4 Computertomographische Untersuchungsreihe	29
2.4.1 3D-Form Analyse des bony interface in Geomagic Qualify 2012	35
2.4.2 Metrische Vermessung des bony interface in VoXim	38
2.4.2.1 Knochenlückenöffnungswinkel	53
2.4.2.2 Knochenlückenbreite	53
2.4.2.3 Interkondylarwinkel	54
2.4.2.4 Interkondylardistanz	54
3. Ergebnisse:	56
3.1 Simulation im 3D Orthognathic Surgery Simulator - Fotoserien	56
3.1.1 Bei Vorverlagerung	57
3.1.1.1 Übersicht	57
3.1.1.2 Fallbeispiel 1 ME13-GIJ-GIX	58
3.1.2 Bei Rückverlagerung	61
3.1.2.1 Übersicht	61
3.1.2.2 Fallbeispiel 6 ME15-EJU-DUP	62
3.2 Computertomographische Untersuchungsreihe	64
3.2.1 3D-Form Analyse des bony interface in Geomagic Qualify 2012	64
3.2.1.1 Bei Vorverlagerung	64
3.2.1.1.1 Übersicht	64
3.2.1.1.2 Fallbeispiele 1 ME13-GIJ-GIX und 2 ME13-EXO-NEZ	65
3.2.1.2 Bei Rückverlagerung	70

3.2.1.2.1	Übersicht	70
3.2.1.2.2	Fallbeispiele 6 ME15-EJU-DUP und 7 ME14-UTA-XOB	71
3.2.2	Metrische Vermessung des bony interface in VoXim	75
3.2.2.1	Knochenlückenöffnungswinkel	75
3.2.2.2	Knochenlückenbreiten	78
3.2.2.3	Interkondylarwinkel	82
3.2.2.4	Interkondylardistanzen	84
4.	Diskussion:	86
4.1	Fallbasierte Modelle	86
4.2	Methodenkritik	87
4.3	Ergebnisse – kritische Auseinandersetzung	91
4.3.1	Knochenlücke und Interferenzen - Form und Veränderungen	91
4.3.2	Gelenkstellung (Wechselbeziehung bony interface - Kondylenposition)	94
4.3.2.1	Weitere Translations- und Rotationsbewegungen der Kondylen	108
4.4	Kontext und Ausblick	111
4.4.1	Ausgleichsmöglichkeiten	112
4.5	Schlussfolgerungen	117
5.	Zusammenfassung	119
6.	Literaturverzeichnis	122
7.	Abbildungsverzeichnis	134
8.	Tabellenverzeichnis	142
9.	Anhang	143
10.	Danksagung	150
11.	Eidesstattliche Versicherung	151

1. Einleitung:

1.1 Die sagittale Spaltung im Unterkiefer

Im Rahmen von skelettverlagernden Operationen im Kiefer- und Gesichtsbereich werden knöcherne Strukturen durchtrennt und nach Verlagerung in neuer Position wieder fixiert. Im Unterkiefer kommt dabei die im angelsächsischen Schrifttum als „bilateral sagittal split osteotomy (BSSO)“ bekannte Operation zum Einsatz. Diese sagittale Spaltung im Bereich von Kieferwinkel und aufsteigendem Unterkieferast ist eine der häufigsten orthognathen Operationstechniken zur Behandlung von mandibulären skelettalen Dysgnathien, sowohl im Rahmen von monognathen als auch von bignathen Umstellungsosteotomien.

Die Geschichte der orthognathen Chirurgie reicht zurück bis in das Jahr 1849, als der amerikanische Chirurg S.P. Hüllihen eine erfolgreiche Behandlung bei einer Frau mit deformiertem Unterkiefer vornahm (Hüllihen 1849). Er korrigierte den nach Verbrennungen mit ungünstigem Narbenzug im Halsbereich entstandenen frontal offenen Biss durch eine alveoläre Osteotomie des Unterkiefers und legte damit den Grundstein zur operativen Therapie von Kieferfehlstellungen (Pistner et al. 1997, Reuther 2000). Die erste Osteotomie des gesamten Unterkiefers mit kompletter Kontinuitätstrennung und anschließender Rückverlagerung bei mandibulärer Prognathie wurde fast fünfzig Jahre später 1897 von V. P. Blair durchgeführt (Blair 1906). Aufgrund einer postoperativen Wundinfektion bei dem Patienten, wurde die Operationstechnik von Ballin modifiziert und der Eingriff in Folge von extraoral durchgeführt (Ballin 1908). Innerhalb der folgenden fünfzig Jahre entwickelten sich sowohl Osteotomien im Unterkiefer als auch Eingriffe zur Verlagerung des Oberkiefers weiter (Berger 1897, Jaboulay und Berard 1898, Ballin 1908, Cohn-Stock 1921, Axhausen 1934). Die Operationsmethoden waren jedoch erst Mitte des 20. Jahrhunderts soweit fortgeschritten, dass sie weltweite Anerkennung und Verwendung fanden (Reuther 2000). Die 1955 von Obwegeser und Trauner eingeführte sagittale stufenförmige Spaltungsosteotomie des aufsteigenden Unterkieferastes mit verschiedenen Modifikationen, beispielsweise 1961 von Dal-

Pont und 1968 von Hunsuck, zählt nach wie vor zu den Standardverfahren der orthognathen Chirurgie (Obwegeser und Trauner 1955, Dal Pont 1961, Hunsuck 1968, Pistner et al. 1997, Pistner 1999).

Bei dieser Technik erfolgt der operative Zugang transoral, womit Narben im ästhetisch wichtigen Gesichtsbereich vermieden werden.

Oberhalb der Lingula mandibulae beziehungsweise des Foramen mandibulae erfolgt eine horizontale Kortikotomie der lingualen Kortikalis vom Ramusvorderrand bis zu dessen Hinterrand (Abbildung 1.1). Anschließend wird die Außenkortikalis je nach Modifikation der Technik horizontal im Bereich des aufsteigenden Unterkieferastes, vertikal im Bereich der Molaren oder schräg durchtrennt und die beiden Osteotomielinien durch eine sagittal ausgerichtete Schnittführung entlang der Linea obliqua verbunden (Roser et al. 2011).

Die Osteotomien können hierbei mit unterschiedlichen Techniken und Instrumenten erfolgen. Die Möglichkeiten reichen von den ursprünglich verwendeten Osteomen und Meißeln über Sägen und Fräsen, bis hin zum Einsatz der Piezochirurgie, bei der mit Hilfe von Ultraschall der Knochen vergleichsweise atraumatisch osteotomiert wird (Robiony et al. 2004, Roser et al. 2011). Dadurch lassen sich einige der typischen Operationsrisiken dieses Eingriffs, welche in erster Linie Nervenschädigungen des N. alveolaris inferior oder ein sogenannter „bad split“ sind, bei dem der Osteotomiespalt vom gewünschten regulären Verlauf abweicht, besser kontrollieren als mit traditionellen Techniken (Steenen et al. 2016, Sahoo et al. 2017).

Die oben angesprochenen Modifikationen der sagittalen Spaltung in der Originalversion nach Obwegeser (Abbildung 1.1 b) unterscheiden sich in der Lokalisation und Ausdehnung der Kortikotomien und infolge dessen maßgeblich in der Größe der knöchernen Anlagerungsfläche, beziehungsweise des bony interface. In der Modifikation nach Dal-Pont wird die horizontal angeordnete bukkale Kortikotomie um 90° rotiert und soweit nach rostral verlagert, dass die nunmehr vertikale Durchtrennung der Außenkortikalis etwa auf Höhe der zweiten Molaren liegt (Abbildung 1.1 c) (Böckmann et al. 2014). Damit wird die knöcherne

Anlagerungsfläche zwischen dem lateralen (proximalen)¹ gelenktragenden und dem medialen (distalen)² Segment signifikant vergrößert. Bei der 1968 von Hunsuck eingeführten „short lingual split osteotomy“ wird die linguale Kortikotomie nicht bis zum Hinterrand des aufsteigenden Astes durchgezogen, sondern endet bereits unmittelbar posterior des Foramen mandibulare (Abbildung 1.1 d) (Hunsuck 1968).

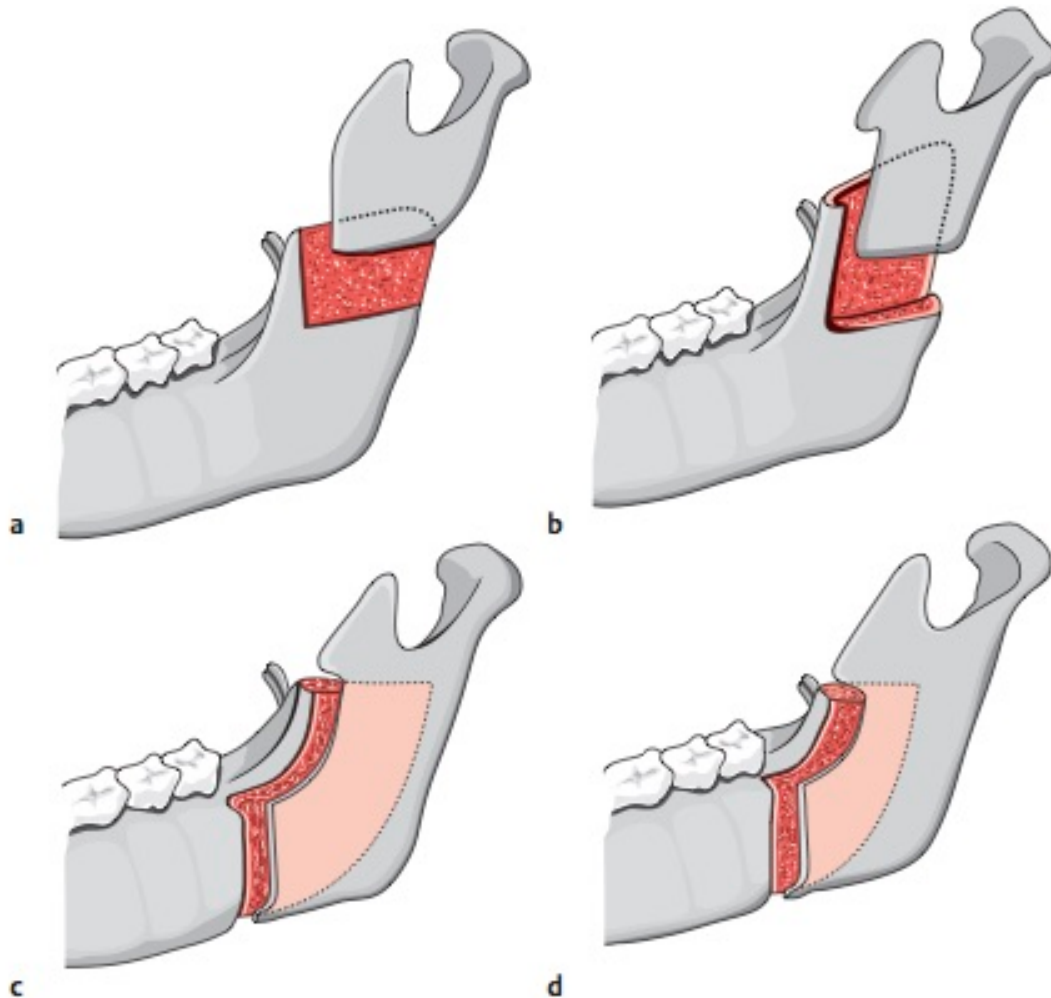


Abbildung 1.1: Varianten der sagittalen Spaltung im Unterkiefer (aus (Roser et al. 2011)): a) „schräge“ sagittale Spaltung nach Perthes (1924) (Perthes 1924) und Schuchardt (1954) (Schuchardt 1954); b) sagittale Spaltung nach Obwegeser; c) Modifikation nach Dal-Pont (1961); d) „short lingual split osteotomy“ nach Hunsuck

¹ Begriffsklärung laterales/proximales Segment: In der Literatur werden sowohl die Begrifflichkeiten „laterales Segment“ als auch „proximales Segment“ verwendet. Diese sind Synonyme und bezeichnen beide das gelenktragende Ramussegment. In der vorliegenden Arbeit wird dafür der Begriff „laterales gelenktragendes Ramussegment“ verwendet.

² Begriffsklärung mediales/distales Segment: In der Literatur werden sowohl die Begrifflichkeiten „mediales Segment“ als auch „distales Segment“ verwendet. Diese sind Synonyme und bezeichnen beide das zahnbogentragende Unterkiefersegment. In der vorliegenden Arbeit werden dafür die Begriffe „mediales Segment“ und „Unterkieferspange“ bzw. „UK-Spange“ synonym verwendet.

1.2 Positionierung der Gelenkköpfe

Nach Osteotomie und Verlagerung in die gewünschte Position muss das mediale Segment des Unterkiefers, also die Unterkieferspange, wieder fixiert werden, um die Knochenheilung in der neuen Kieferrelation zu ermöglichen. In der Originalmethode nach Obwegeser 1963 (Obwegeser 1963) erfolgte eine Adaptationsosteosynthese durch Drahtnähte im Bereich beider Kieferwinkel und eine anschließende mehrwöchige intermaxilläre Fixation, bei der der Unterkiefer mit Hilfe von Schienen und Drahtligaturen am Oberkiefer befestigt und stabilisiert wurde (Reuther 2000).

Die Einführung der Zugschraubenosteosynthese in die Dysgnathiechirurgie 1974 durch Spiessl brachte zwar den großen Vorteil, dass auf eine intermaxilläre Fixation verzichtet werden konnte, brachte jedoch gleichzeitig die Problematik unbeabsichtigter Verschiebungen und dementsprechend einer exakten Positionierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente in einer funktionell unbedenklichen Stellung mit sich (Spiessl 1974).

Da der Mandibularbogen eine Parabelform hat, kommt es bei Umstellungen zwangsläufig zu Knocheninterferenzen und Lücken durch Inkongruenz zwischen den lateral ausladenden Enden der Unterkieferspange und den Medialflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente. Dies liegt daran, dass durch die erwähnte Parabelform der Verlauf der sagittalen Spaltung entlang des Unterkieferasts von proximal nach distal nicht parallel zur anteroposterioren Verlagerungsrichtung in der Sagittalebene ist (Lindorf 1986). In Analogie zum Wirkprinzip eines Schneepfluges lässt sich dieses Phänomen als „Schneepflugeffekt“ bezeichnen.

In der Konsequenz würde bei einer forcierten Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente, um einen lückenfreien Anlagerung zu ermöglichen, eine Veränderung der Gelenkstellung resultieren (Tuinzing und Swart 1978). Die Interkondylardistanz würde bei einer Vorverlagerung der zahntragenden Unterkieferspange größer und bei Rückverlagerung kleiner (Lindorf 1986).

Besonders ausgeprägt ist diese Problematik bei der Korrektur von asymmetrischen skelettalen Dysgnathien des Unterkiefers durch bilaterale sagittale Spaltung (Yang und Hwang 2014a). Zusätzlich zur Translation, ist hierbei eine Rotation der Unterkieferspange um eine Vertikalachse notwendig, wodurch die knöchernen

Interferenzen auf Seiten der defizienten Hemimandibel in den Vordergrund treten (Yoshida et al. 2001, Yang und Hwang 2014a).

Die Interaktionen der einzelnen Segmente im bony interface, sei es durch Kollision oder durch Knochenlücken, führen dazu, dass die präoperative Kiefergelenkposition nicht ohne Weiteres aufrechterhalten werden kann.

Diskrepanzen der Kondylenposition von prä- zu postoperativ werden als Ursache skelettaler und okklusaler Instabilität diskutiert, die direkt post-operativ oder verzögert mit Malokklusionen und Rezidiven einhergehen können (Ellis 1994).

Weitere postoperative Komplikationen, die in Verbindung mit veränderten Kondylenpositionen diskutiert werden, sind craniomandibuläre Dysfunktionen (CMD) und kondyläre Resorptionen beziehungsweise Rezidive durch kondyläre Resorptionen (Kerstens et al. 1990, Moore et al. 1991, Merckx und Van Damme 1994, Cutbirth et al. 1998, Hoppenreijds et al. 1998, Hwang et al. 2000, Hwang et al. 2004).

Die Aufrechterhaltung der originären Gelenkposition beziehungsweise ihre Veränderung sind daher seit Jahrzehnten Gegenstand kontroverser Debatten (Hiatt et al. 1988, Luhr und Kubein-Meesenburg 1989, Ellis 1994, Betttega et al. 1996, Gerressen et al. 2006, Costa et al. 2008, Abdel-Moniem Barakat et al. 2014).

Als einen der ersten Vorschläge zur Lösung des Problems, stellte Spiessl 1974 unter anderem eine intraorale Apparatur zur Beibehaltung der Gelenkposition vor (Spiessl 1974).

Die Methoden und Apparaturen zur Gelenkpositionierung im Rahmen einer BSSO werden als „condylar positioning method“ - CPM beziehungsweise „condylar positioning device“ - CPD bezeichnet. Leonard schlug 1976 den Standard Einsatz von CPMs vor und entwickelte eine identische Methode wie Spiessl 1974, zur Lagesicherung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (Leonard 1976). Bei dieser Technik wird durch eine an den bukkalen Flächen des Oberkiefers angebrachte Apparatur vor der Osteotomie eine Markierung auf dem lateralen gelenktragenden Ramussegment eingefräst. Nach Osteotomie und mandibulo-maxillärer Fixation wird die Apparatur erneut eingegliedert, um mögliche Verschiebungen des lateralen gelenktragenden Ramussegments durch Abgleich mit der vorherigen Markierung erkennen zu können (Leonard 1976). Allerdings erlaubt

diese Technik nur eine relativ genaue Einschätzung der Rotationsbewegungen des lateralen gelenktragenden Ramussegments, weniger der Bewegungen in den drei Raumebenen (Leonard 1976, Ellis 1994).

Luhr befasste sich ebenfalls intensiv mit der CPM Thematik (Luhr 1985, Luhr et al. 1986, Luhr 1989, Luhr und Kubein-Meesenburg 1989, Luhr et al. 1991). Luhr et al. 1991 entwickelten eine Technik, bei der der Erhalt der präoperativen Gelenkposition durch Fixierung des lateralen gelenktragenden Ramussegments vor Osteotomie entweder an einem zahngetragenen Doppelsplint (für die alleinige BSSO) oder an der unteren Jochbeinprominenz (für BSSO im Rahmen von bignathen Umstellungen) sicher gestellt wird (Luhr et al. 1991).

Eine etwas andere Herangehensweise wurde 1986 von Lindorf in Form der Tandemschraubenfixation beschrieben (Lindorf 1986). Bei der Verschraubung wird hier der intersegmentale Osteotomiespalt nicht wie bei der Zugschraubenosteosynthese durch forciertes Anlagern geschlossen, sondern durch sogenannte Positionierungsschrauben beibehalten. Mit dieser Methode konnten die Vorteile einer stabilen Osteosynthese, das heißt der Verzicht auf intermaxilläre Fixation, mit dem Ausschluss ihrer Nachteile, das heißt einer Veränderung der Gelenkkopfposition, kombiniert werden.

Eine alternative Methode stellte Joos 1991 mit dem „Split-fix System“ vor (Joos 1999). Damit wird versucht einen Kompromiss zwischen einer Adaptation mit Drahtnaht und einer stabilen Plattenosteosynthese zu finden. Durch Gestaltung mit einem Doppelsteg und Reduzierung der Materialstärke weisen diese Platten eine relativ hohe Flexibilität auf, sodass stärkere Dislokationen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente vermieden werden, allerdings auf Kosten der Stabilität der Osteosynthese. Zusätzlich sind die Split-fix Platten intraoperativ in drei Dimensionen adjustierbar, was Korrekturen der Position der lateralen gelenktragenden Ramussegmente bis zum Erreichen einer zufriedenstellenden Okklusion bzw. Gelenkposition erlaubt (Joos 1999).

Die Berichte in der Literatur über den Einsatz von condylar positioning methods (CPM) (Epker und Wylie 1986, Hiatt et al. 1988, Luhr und Kubein-Meesenburg 1989, Rotskoff et al. 1991, Merten und Halling 1992, Bettega et al. 1996, Abdel-Moniem Barakat et al. 2014), vergleichende Studien von CPM mit traditionellen Methoden

(Helm und Stepke 1997, Bettega et al. 2002, Gerressen et al. 2006) und ausführliche Literatur Reviews (Ellis 1994, Costa et al. 2008) kommen zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen, sowohl im Bezug auf die Genauigkeit von CPMs als auch deren Effekt auf das postoperative Auftreten von Komplikationen im Kiefergelenk und somit deren Notwendigkeit. So findet beispielsweise Ellis 1994 nach einem ausführlichen Review keine konkrete Antwort (Ellis 1994), Helm und Stepke 1997 beschreiben hingegen eine effektive Positionierung der Kondylen mit dem CPM System nach Luhr (Helm und Stepke 1997). Gerressen et al. 2006 (Gerressen et al. 2006) und Costa et al. 2008 (Costa et al. 2008) sehen andererseits keine Evidenz für einen routinemäßigen Einsatz von condylar positioning devices (CPD).

In den 15 Jahren zwischen den beiden Literatur Reviews von Ellis 1994 (Ellis 1994) und Costa 2008 (Costa et al. 2008) hat sich somit keine Entscheidung für oder gegen CPD beziehungsweise CPMs ergeben. Eine aktuelle Metaanalyse von Al-Moraissi et al. 2017 (Al-Moraissi et al. 2017) bei der Ellis mitgewirkt hat, versucht unter Berücksichtigung der CPDs/CPMs zu evaluieren, ob durch orthognathe Chirurgie craniomandibuläre Dysfunktionen eher positiv beeinflusst oder eher ausgelöst werden (Al-Moraissi et al. 2017).

Zusammenfassend fehlen im Schrifttum also nach wie vor definitive Antworten darauf, wie die Positionierung der Kondylen durchzuführen ist: ob nach Expertise des Operateurs, durch Einsatz spezieller Gerätschaften oder durch die Verwendung von Osteosynthesystemen.

Die Veränderungen der Gelenkstellung nach sagittalen Osteotomien des Unterkiefers wurden in der Vergangenheit bereits vielfach durch unterschiedliche Verfahren untersucht und dargestellt. Einige Studien verwendeten konventionelle röntgenologische Aufnahmetechniken, wie das Fernröntgenseitenbild (Reuther et al. 1981, Waldhart und Krenkel 1981), die Röntgenaufnahme nach Schüller (Freihofer und Petrešević 1975), die submento-vertex Schädelaufnahme (Will et al. 1984, Hackney et al. 1989) und die postero-anteriore Schädelaufnahme (Fernröntgenfrontalaufnahme) (Angle et al. 2007).

Andere Studien wie von Landes und Sterz 2003 und Gerressen et al. 2006 verwendeten die Achsiographie zur Analyse der Gelenkfunktion nach orthognather Chirurgie (Landes und Sterz 2003, Gerressen et al. 2006).

Diese Untersuchungen sind jedoch durch die zweidimensionale Darstellung in ihrer Genauigkeit eingeschränkt.

Mit der Entwicklung neuerer bildgebender Verfahren wurden weitere Studien durchgeführt, die die Computertomographie (CT) (Spitzer et al. 1984, Harris et al. 1999), die Magnetresonanztomographie (MRT) (Saka et al. 2004) und die digitale Volumentomographie (DVT) (Chen et al. 2013) zur Untersuchung der Kondylenposition nach orthognather Chirurgie verwendeten.

Durch den immer weiter voranschreitenden Einsatz von computergestützten Methoden erfährt die orthognathe Chirurgie momentan einen Paradigmenwechsel (Bell 2011, Markiewicz und Bell 2011, Zinser et al. 2013). Die virtuellen Planungsverfahren erlauben jetzt die dreidimensionale Betrachtung der nach BSSO und korrektiver Umstellung entstehenden knöchernen Kontaktflächen (bony interfaces) und Knochenlücken und ergänzen die Vorstellungen aus den älteren zweidimensionalen Untersuchungen. Der direkte Zusammenhang zwischen der Morphologie des bony interface und möglicher Veränderungen im Kiefergelenk kann anschaulicher als bisher dargestellt werden.

Eindrückliche Beispiele für diese innovativen Ansätze sind die durchgeführten DVT Untersuchungen des Unterkiefers und der Kondylen vor und nach orthognather Chirurgie von Cevitanes et al. 2007 (Cevitanes et al. 2007) oder von Kühle et al. 2016 (Kuehle et al. 2016).

Aus der verbesserten Bildgebung resultiert das Bestreben, Methoden zu entwickeln, die für den zukünftigen routinemäßigen Einsatz als condylar positioning methods (CPMs) in Frage kommen.

Dieses Bestreben wird durch aktuelle Herangehensweisen wie von Seeberger et al. 2013 und Berger et al. 2018 deutlich, die bei Unterkieferverlagerungen die neuen Technologien zur Kondylenpositionierung nutzten (Seeberger et al. 2013, Berger et al. 2018). Seeberger et al. verwendeten die Digitale Volumentomographie (DVT) für intra- und postoperative Kontrollen der Kondylenpositionen (Seeberger et al. 2013).

Berger et al. 2018 nutzten eine intraoperative elektromagnetische Echtzeit-Navigation zur Orientierung und Positionierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (Berger et al. 2018).

Auch Methoden mit geringer Invasivität, wie die Positionierung der Kondylen unter intraoperativem sonografischem Monitoring werden seit längerem verfolgt (Landes 2004) und neuerdings zusätzlich mit weiteren bildgebenden Verfahren zur Überprüfung der Genauigkeit kombiniert (Bethge et al. 2015). Bei der sonografisch gestützten Positionierung stellen sich als Vorteile die geringe Invasivität, leichte Anwendbarkeit, Schnelligkeit und verhältnismäßig geringer Kostenaufwand dar (Bethge et al. 2015).

Systematische Untersuchungen zur Geometrie der Vorgänge im bony interface und ihrer Beeinflussbarkeit, die in der virtuellen Planung zukünftig von Bedeutung sein könnten, fehlen jedoch bisher weitgehend.

1.3 Planung von Umstellungsosteotomien

1.3.1 Planung im Artikulator mit Gipsmodellen

Die traditionelle Methode zur Therapieplanung von Dysgnathien ist die kephalometrische Prädiktion und Modelloperation anhand von Gipsmodellen im Artikulator (Steinhäuser und Janson 1988, Ellis 1990). Dazu werden Gipsmodelle des Ober- und Unterkiefers nach einer Gesichtsbogenübertragung und Bissnahme zur Verschlüsselung der Okklusion schädel- und gelenkbezüglich in einem teil- oder volladjustierbaren Artikulator auf Gipssockeln einartikuliert (Abbildung 1.2). Im Rahmen der Modelloperation werden die Modelle verlagert, um der gewünschten therapeutischen Position zu entsprechen (Ellis et al. 1984, Ellis 1990). Die Beträge der Verschiebungen um die therapeutische Situation zu erreichen, können durch entsprechende Markierungen an den Gipssockeln, beziehungsweise im Bereich der Zahnreihen, abgelesen werden. In dieser Sollposition werden die Modelle über interokklusale Splints verschlüsselt. Falls die geplante Korrektur eine bignathe Operation, also die Verlagerung des Ober- und Unterkiefers, vorsieht, ist die Verwendung der sogenannten „Doppelsplintmethode“ üblich (Lindorf 1977, Mast und Ehrenfeld 2010, Roser et al. 2011). Diese Methode erfordert die Herstellung eines Zwischensplints und eines Zielsplints. Der Zwischensplint ermöglicht durch Insertion zwischen den Zahnreihen und mandibulo-maxilläre Fixation (MMF) über Drahtligaturen, die Positionierung des in der Regel im ersten Operationsschritt osteotomierten Oberkiefers im Bezug zum noch unveränderten Unterkiefer. Nachdem das Oberkiefersegment durch Osteosyntheseplatten am Mittelgesicht fixiert worden ist, kann die MMF gelöst und der Unterkiefer, nach BSSO, Mobilisation der UK-Spange und Einbringen des Zielsplints, in die definitive Stellung gebracht werden (Roser et al. 2011). Die Reihenfolge der Umstellungen kann jedoch auch umgekehrt erfolgen (Unterkiefer vor Oberkiefer).



Abbildung 1.2: Modelloperation im Artikulator an Gipsmodellen (aus (Roser et al. 2011)): Durch die Markierungen an den Gipssockeln lassen sich die Beträge der geplanten Verlagerungen ablesen. In diesem Fall soll eine Vorverlagerung des Unterkiefers um 7 mm links und 6 mm rechts sowie eine Kaudalverlagerung um 5 mm und eine Seitwärtsverlagerung um 2 mm nach rechts erfolgen.

Ein spezialisierter Artikulator für Modelloperationen ist der 3D-Orthognathic Surgery Simulator (3D-OSS) (Abbildung 1.3) entwickelt von Krenkel und Lixl zusammen mit der Firma Girrbach Dental (Pforzheim, Deutschland) (Krenkel und Lixl 1991). Der 3D-OSS ist ein Operationssimulator, an dem nicht allein auf die Gipsmodelle beschränkte Modelloperationen durchgeführt werden können, sondern sich auch die lateralen gelenktragenden Ramussegmente des Unterkiefers und die Kiefergelenke in ihrer dreidimensionalen Lage darstellen lassen. Dazu sind der Gerätetisch und der Artikulator mit vier Zusatzkomponenten ausgestattet:

1. Einem Schwenkarm, an dem der über intermaxilläre Ligaturen zusammengefügte mandibulo-maxilläre Block nach Entfernung des Artikulatoroberteils befestigt werden kann und der über ein 3D-Gelenk verfügt, das 6 Freiheitsgrade besitzt. Der Schwenkarm ist über einen sogenannten „3D-Schlitten“ auf der Bodenplatte angebracht, der kontrollierte Translationsbewegungen in den drei Raumebenen erlaubt. Die Rotationsbewegungen (um die x-Achse/Transversalachse („pitch“), die y-Achse/Vertikalachse („yaw“) und die z-Achse/Sagittalachse („roll“)) werden durch Drehgelenke im Aufhängungsgestänge ermöglicht (Ellis 2007).
2. Einem Messarm mit einem sogenannten Nadelmesskopf, über den die Bewegungen des mandibulo-maxillären Blocks in allen Richtungen registriert werden können. Translationen entlang der Transversal- und Sagittalachse (x-

Achse und z-Achse) werden über Verschiebungen der Messnadeln auf der Platte des Schwenkarms mittels Millimeterpapier registriert. Translationen auf der y-Achse werden direkt an den Messnadeln abgelesen. Veränderungen der Angulation können über einen aufsteckbaren Winkelmesser quantifiziert werden.

3. Einem sogenannten Frontzahnführungsstift mit Inzisal- und Kinnpunktzeiger zur Mittellinienbestimmung und Definition des Interinzisal- und Kinnpunkts.
4. Schablonen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente, die an Messingkondylen in dafür vorgesehenen Gehäusen aufgehängt sind (sogenannte Ramusschablonen).



Abbildung 1.3: Der 3D Orthognathic Surgery Simulator (3D-OSS) nach Krenkel und Lixl (Salzburg) (aus (Roser et al. 2011)): Übersichtsbild: Hinten rechts der 3D-Schlitten mit Schwenkarm und 3D-Gelenk und daran befestigtem mandibulo-maxillären Block. Links der Messarm mit Nadelmesskopf. Vorne rechts der Frontzahnführungsstift mit Inzisal- und Kinnpunktzeiger. Mittig die rechte Ramusschablone die an einem Messingkondylus (gold) aufgehängt und lose an den mandibulo-maxillären Block adaptiert ist. Die linke Ramusschablone ist auf dem Bild verdeckt. Detail rechts: Messingkondylus (gold) in dem dafür vorgesehenen Gehäuse (Fossa) von oben. Am roten Zeiger und der entsprechenden Skala lassen sich Rotationsbewegungen des Messingkondylus um die Vertikalachse ablesen.

Der 3D-OSS erlaubt durch die Visualisierung der Kondylen und der aufsteigenden Unterkieferäste (d.h. der Ramusschablonen) eine Vorhersage, wie sich die Bewegungen des mandibulo-maxillären Blocks auf die lateralen gelenktragenden Ramussegmente und somit die Gelenkköpfchen auswirken. In der Modelloperation kann das bony interface bei der Simulation der geplanten Translationen und Rotationen auf mögliche, durch Kollisionen und Lückenbildungen intraoperativ

auftauchende Probleme bei der Osteosynthese präoperativ beurteilt und diese gegebenenfalls ausgeglichen werden (Csaszar und Brüker-Csaszar 2000, Roser et al. 2011).

1.3.1 Virtuelle Planung von Umstellungsosteotomien

Schon im Jahr 2000 prognostizierte Reuther: „Neu- bzw. Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Computersimulation dürften uns in Zukunft Systeme zur Verfügung stellen, die eine dreidimensionale computerassistierte Gesichtsplanung ermöglichen, mit denen alle Teilaspekte der zu verlagernden Segmente simuliert werden können [...]“ (Reuther 2000). Inzwischen bieten neuartige Technologien in den verschiedenen Phasen des Behandlungsablaufs, sowohl in der Therapieplanung als auch intraoperativ, tatsächlich verlässliche Alternativen zu den „klassischen“ Methoden (Bell 2011, Markiewicz und Bell 2011, Zinser et al. 2012, Polley und Figueroa 2013, Zinser et al. 2013, Kim et al. 2014a).

Zur Dokumentation und digitalen Planung werden Datensätze im Rahmen eines digitalen workflows in verschiedene Softwareprogramme eingespeist, die der Auswertung und Simulation dienen (Westermarck et al. 2005, Schramm et al. 2007, Metzger et al. 2008, Roser et al. 2011). Zur Erstellung dieser Datensätze werden unter anderem Computertomographie (CT), Digitale Volumentomographie (DVT), Oberflächen Scans des Gesichtes und der okklusalen Verhältnisse benutzt.

Die Übertragung der dreidimensionalen Operationssimulation in den Operationssaal erfolgt computerassistierte, durch Verfahren wie Navigation und die Verwendung von CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) gefertigten dreidimensional gedruckten STL (Stereolithographie) Modellen, interokklusalen Splints, Bohrschablonen, condylar positioning devices (CPD) und patientenspezifischen Implantaten (PSI) (Gateno et al. 2003, Gateno et al. 2007, Swennen et al. 2009, Xia et al. 2009, Zinser et al. 2012, Polley und Figueroa 2013, Zinser et al. 2013, Abdel-Moniem Barakat et al. 2014, Farrell et al. 2014, Jaisinghani et al. 2017, Pascal et al. 2018).

1.3.2 Digitale Planung in der MKG Chirurgie der LMU München

In der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der LMU München erfolgt die präoperative Therapieplanung von orthognathen Operationen zu einem großen Teil digital. Nach Erstellung von digitalen Datensätzen (DVT/CT/Surface Scans) werden diese hochgeladen und zur Bearbeitung mit der Software Materialise ProPlan CMF (Materialise NV; Leuven, Belgien) segmentiert beziehungsweise vorbereitet. Unter Verwendung dieser Software wird die Operationssimulation digital in einer interaktiven Websession zwischen dem Operateur und einem „Clinical Engineer“ der Firma Materialise durchgeführt.

Anschließend werden in Zusammenarbeit mit der Firma DePuy Synthes CMF (West Chester, USA) in der Minimalvariante die perioperativ verwendeten Zwischen- und Zielsplints hergestellt. Darüber hinaus können Stereolithographiemodelle des knöchernen Gesichtsschädels, des Oberkiefers und der Mandibula sowie patientenspezifische Implantate (PSI) hergestellt werden.

1.4 Ziel der Arbeit

Nach bilateralen sagittalen Spaltungsosteotomien (BSSO) im Kieferwinkel- und Ramusbereich kann es bei korrekativer Umstellung (Vor- oder Rückverlagerung) der Unterkieferspange zu Knocheninterferenzen und Lückenbildung durch Kollisionen der dorsolateralen Segmentflächen der Unterkieferspange mit den Medialflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente kommen. Die Variation der Geometrien im Osteotomiespalt im Wechselspiel mit der Kondylenposition ist kaum systematisch untersucht, weil dazu geeignete bildgebende Verfahren bisher nicht zur Verfügung standen. Erst moderne Technologien und virtuelle Planungsverfahren erlauben eine dreidimensionale Einsichtnahme.

Obwohl die Digitalisierungsprozesse in der orthognathen Chirurgie weit fortgeschritten sind, gibt es nach wie vor Defizite vor allem beim Transfer der virtuellen Planung von BSSO in den Operationssitus (Roser et al. 2011). Dies wurde zuletzt von Suojanen et al. 2017 in einer aktuellen Studie gezeigt, die den Einsatz von präoperativ virtuell geplanten Bohr- und Sägeschablonen, kombiniert mit patientenspezifischen Implantaten, bei 30 Patienten mit BSSO untersuchten (Suojanen et al. 2017). Dabei wurde die Passung der PSIs nur bei 11 der 30 Patienten als „exzellent“ bewertet. Als gewichtiger Grund für Passungenauigkeiten werden im Übrigen das unvorhersehbare Verhalten der lateralen gelenktragenden Ramussegmente nach Osteotomie und nicht ohne Weiteres identifizierbare Knocheninterferenzen genannt (Suojanen et al. 2017).

Ziel des vorliegenden Modellversuches war deshalb die Visualisierung und Bewertung der bony interfaces nach sagittaler Spaltungsosteotomie an Stereolithographiemodellen (STL-Modellen) nach inkrementeller anteriorer und posteriorer Translation der Unterkieferspange.

Dazu wurden die Beurteilungsmöglichkeiten des bony interface im 3D-OSS nach Krenkel und Lixl, die ca. 25 Jahre alt sind mit neuen digitalen Techniken kombiniert. Durch eine computergestützte Bestimmung der Kontakte und Dimensionsänderungen im bony interface mithilfe einer CT- Untersuchungsreihe an STL-Modellen in einem selbst entwickelten metallfreien Simulator wurde versucht, die Verhältnisse zu visualisieren und die Präzision der Vorhersagen (im 3D-OSS) durch Systematisierung zu verbessern.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Zusammenhänge zwischen bony interface und der Gelenkstellung im Detail genauer zu verstehen und dazu beizutragen, Diskrepanzen zwischen digitaler Planung und intraoperativer Umsetzung zu verringern.

2. Material und Methode:

2.1 Fallbasierte Modelle

In dieser Modellstudie wurden Stereolithographiemodelle von insgesamt 6 Patienten verwendet, bei denen in der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der LMU München wegen unterschiedlicher Dysgnathien Umstellungsosteotomien vorgenommen wurden (Tabelle 2.1).

Es handelte sich um 3 Patienten mit einer mandibulären Retrognathie und um 3 Patienten mit einer mandibulären Prognathie (Tabelle 2.1). Bei allen Patienten wurde die Indikation für eine bignathe Umstellungsosteotomie gestellt, die eine bilaterale sagittale Spaltungsosteotomie (BSSO) umfasste.

Vorverlagerungen (mandibuläre Retrognathie)	Rückverlagerungen (mandibuläre Prognathie)
Fall 1 ME13-GIJ-GIX	Fall 4 ME14-XEK-TIQ
Fall 2 ME13-OXO-NEZ	Fall 5 ME15-EJU-DUP
Fall 3 ME14-RUJ-ZOT	Fall 6 ME14-UTA-XOB

Tabelle 2.1: Alle in der Modellstudie untersuchten Fälle mit Fallnummern und Art der Dysgnathie (in Klammern), sortiert nach Verlagerungsrichtung.

2.2 Stereolithographiemodelle

Die im Modellversuch verwendeten Stereolithographiemodelle (STL-Modelle) wurden durch die Firma DePuy Synthes CMF (West Chester, USA), basierend auf zuvor angefertigten Computertomographie Aufnahmen, hergestellt. Für jeden Patienten wurde eine vollständige digitale Therapieplanung mit spezieller Software (Materialise Proplan CMF (Materialise NV; Löwen, Belgien)) durchgeführt, auf deren Basis verschiedene Kunststoff STL-Modelle und Splints für die Übertragung der Planung in den Operationssitus hergestellt wurden. Abbildung 2.1 zeigt eine Auswahl solcher Modelle.



Abbildung 2.1: Eine Auswahl verschiedener Stereolithographiemodelle: Links oben: Modell des Mittelgesichts/Craniums und des Unterkiefers in Ausgangssituation. Rechts oben: Modell des Unterkiefers nach Osteotomie und Vorverlagerung. Links unten: Einzelmodelle nach Osteotomie der UK-Spange und der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (BSSO) von kranial. Rechts unten: Einzelmodelle nach Osteotomie des OK und UK in Okklusion als „mandibulo-maxillärer Block“ und die lateralen gelenktragenden Ramussegmente.

2.3 Simulation im 3D Orthognathic Surgery Simulator - Fotoserien

Die STL-Modelle wurden in den Artikulator 3D-OSS (3D Orthognathic Surgery Simulator) (Girrbach Dental, Koblach, Österreich) von Krenkel und Lixl einartikuliert (Abbildung 2.2).

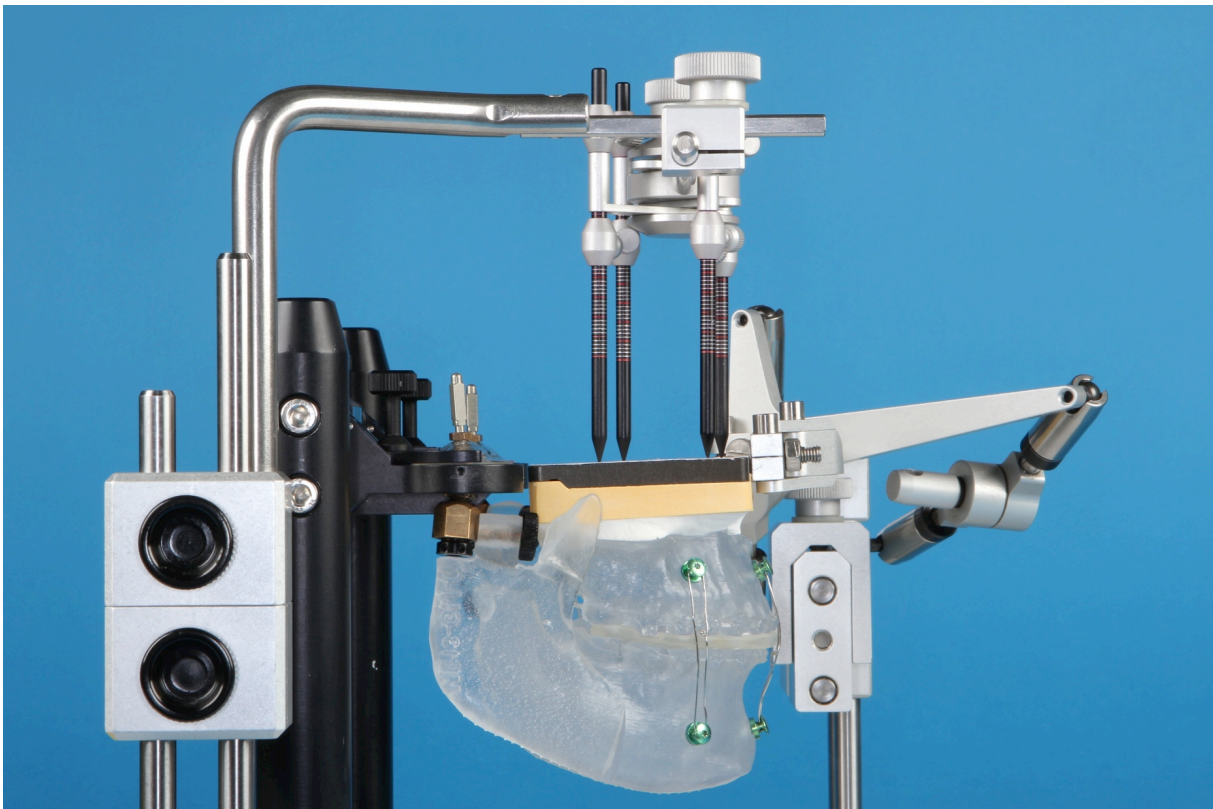


Abbildung 2.2: Der 3D-OSS von rechts nach Montage der Modelle in Ausgangsposition. In der Mitte sind der Ober- und Unterkiefer mittels Drahtligaturen zum mandibulo-maxillären Block verbunden und am 3D-Schlitten (rechts) durch den Schwenkarm und das 3D-Gelenk befestigt. Darüber der Nadelmesskopf, der mit dem Messarm (links) verbunden ist und mit der Registrierplatte Kontakt hat. Die lateralen gelenktragenden Ramussegmente sind über Messingkondylen im Artikulator montiert.

Mit Hilfe eines Gesichtsbogens unter entsprechender Verschlüsselung der Oberkieferokklusion erfolgte die Übertragung des Mittelgesichts/Craniums STL-Modells mit entsprechender Schädelrelation in den Artikulator.

Anschließend wurde das STL-Modell auf Höhe der Le-Fort I Ebene abgesetzt und das Oberkiefersegment in dieser Position im Artikulator mit Gips fixiert. Mittels der (präoperativen) Bissnahme wurde das Gegenstück, ein STL-Modell der bereits

rechts und links osteotomierten und somit separierten UK-Spange auf einem Gipssockel im Artikulator fixiert. Um die STL-Modelle der separierten rechten und linken lateralen gelenktragenden Ramussegmente im Artikulator zu montieren, wurden die Kondylen abgetrennt und jeweils durch den vorgefertigten Messingkopf des 3D-OSS, an identischer Stelle des zuvor entfernten Kondylus, ersetzt.

Diese Messingköpfe ließen sich mittels Schrauben in dafür vorgesehenen Gehäusen (Fossae) im 3D-OSS Artikulator befestigen. Somit konnten die lateralen gelenktragenden Ramussegmente am medialen Segment so adaptiert werden, dass die „präoperative“ Anatomie wiederhergestellt wurde. Die Messingköpfe und die Gehäuse des 3D-OSS waren so konstruiert, dass Rotationen der Kondylen um die Sagittal-, Transversal-, und Vertikalachse entweder ermöglicht oder durch Feststellschrauben unmöglich gemacht werden konnten.

Das Oberteil des 3D-OSS Artikulator wurde anschließend entfernt und der Oberkiefer in der identischen Position an dem bewegbaren 3D-Schwenkarm befestigt. Über 3 Schrauben pro Kiefer, erfolgte die mandibulo-maxilläre Fixation mittels Drahtligaturen. Nach der Entfernung des Unterkiefergipssockels war der mandibulo-maxilläre Block am Schwenkarm des Artikulators fixiert und somit in allen 3 Translationsrichtungen bewegbar und um alle 3 Achsen rotierbar, das heißt in allen 6 Freiheitsgraden kontrolliert beweglich. Darüberhinaus besaß der 3D-OSS einen Messarm, über den die Bewegungen des mandibulo-maxillären Blocks in allen Richtungen registriert werden konnten (Abbildung 2.2 und 2.3).

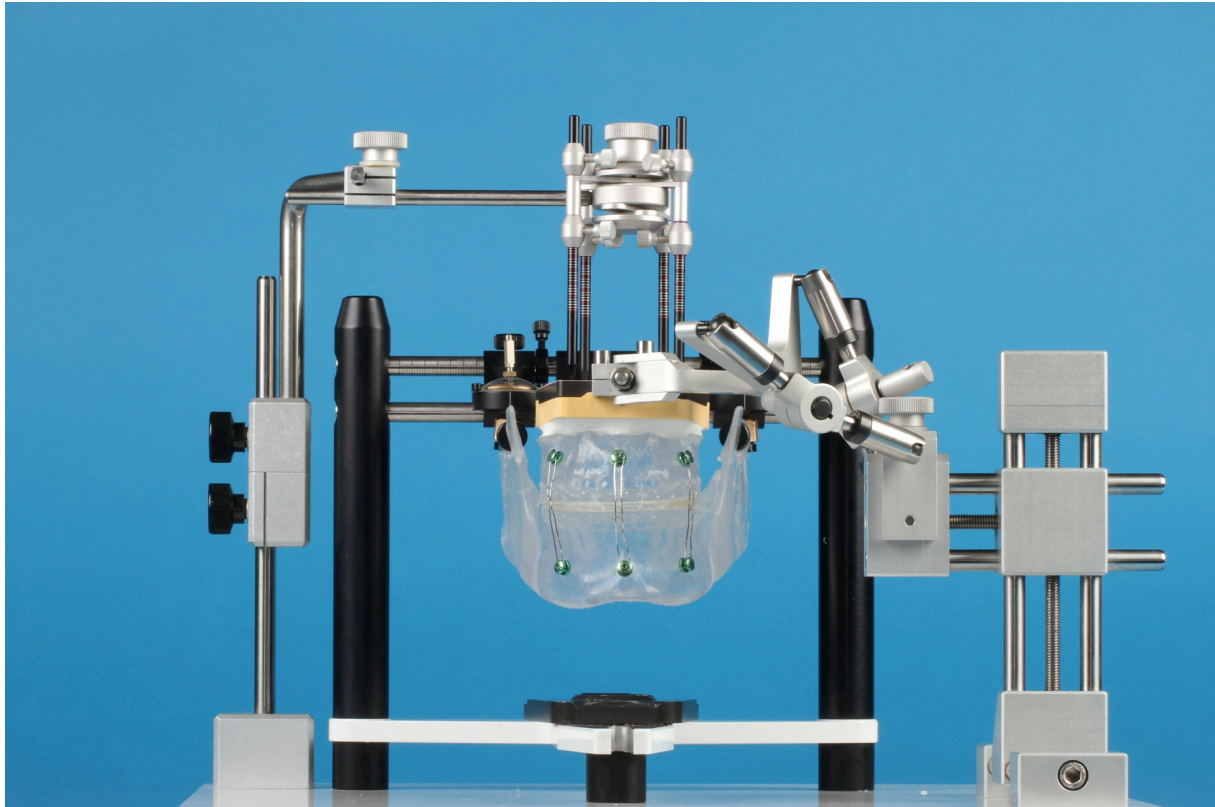


Abbildung 2.3: Konfiguration des 3D-OSS nach vollständigem Einbau der Modelle von anterior. In der Mitte sind der Ober- und Unterkiefer mittels MMF über Drahtligaturen zum mandibulo-maxillären Block verbunden und am 3D-Schlitten (rechts) durch den Schwenkarm und das 3D-Gelenk befestigt. Links der Messarm mit Nadelmesskopf.

Die Initialposition, von wo aus die Translation nach anterior oder posterior durchgeführt wurde, war die Position nach Ausgleich transversaler Abweichungen (genannt „canting“) und vertikaler Abweichungen des mandibulo-maxillären Blocks in Bezug zur gedachten Bipupillarlinie bzw. Horizontalebene. Es folgte eine inkrementelle Translation nach anterior oder posterior in Millimeterschritten von 4-12 mm (exemplarisch in Abbildung 2.4 - 2.6). Zur Erfassung der Ergebnisse erfolgte eine Fotodokumentation, bei der jede Translationsposition und die entsprechenden Veränderungen von anterior, posterior, rechts, links, und zur besseren Einsichtnahme in die Osteotomiespalten von anterior kranial exzentrisch rechts und links mittels Fotoserien abgelichtet wurden.

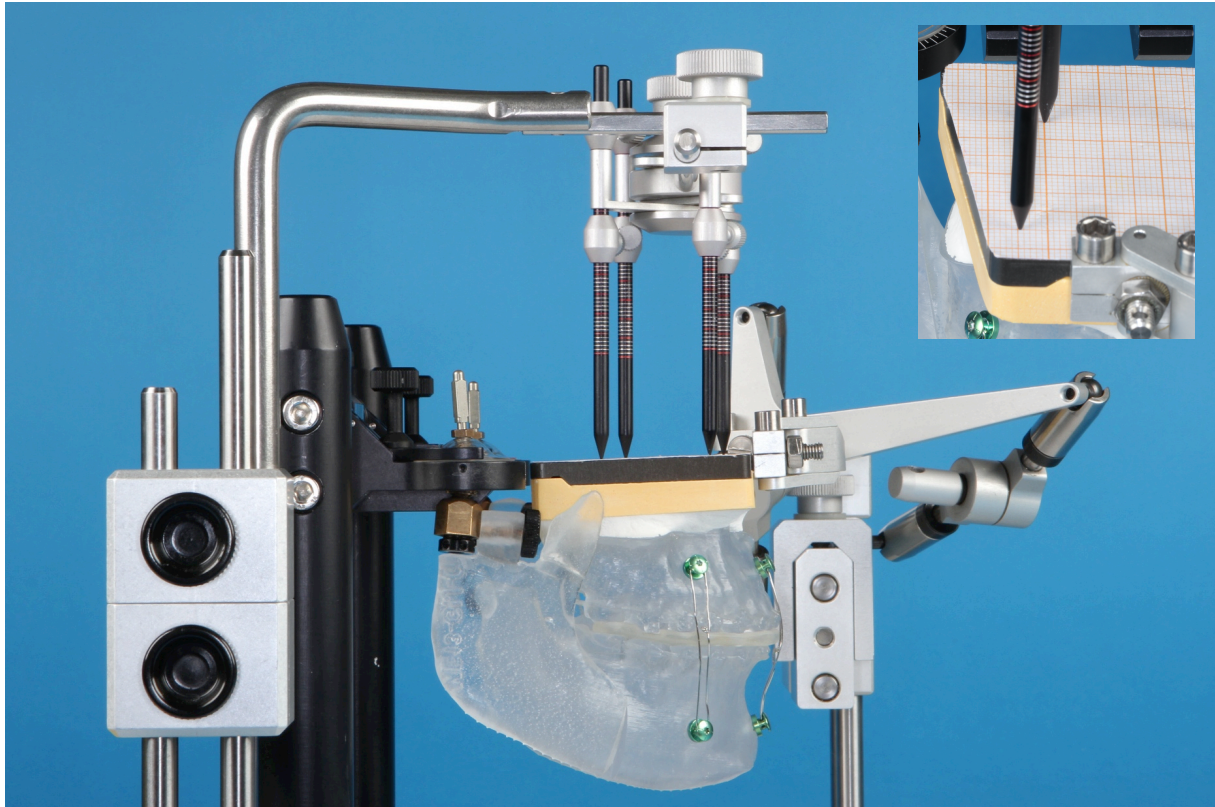


Abbildung 2.4: Darstellung des 3D-OSS von rechts: Inkrementellen Translation am Beispiel einer Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks in der Ansicht von lateral - Ausgangssituation „0 mm“. Ausschnitt oben rechts: gleiche Position des mandibulo-maxillären Blocks in der Ansicht von kranial auf das Millimeterpapier.

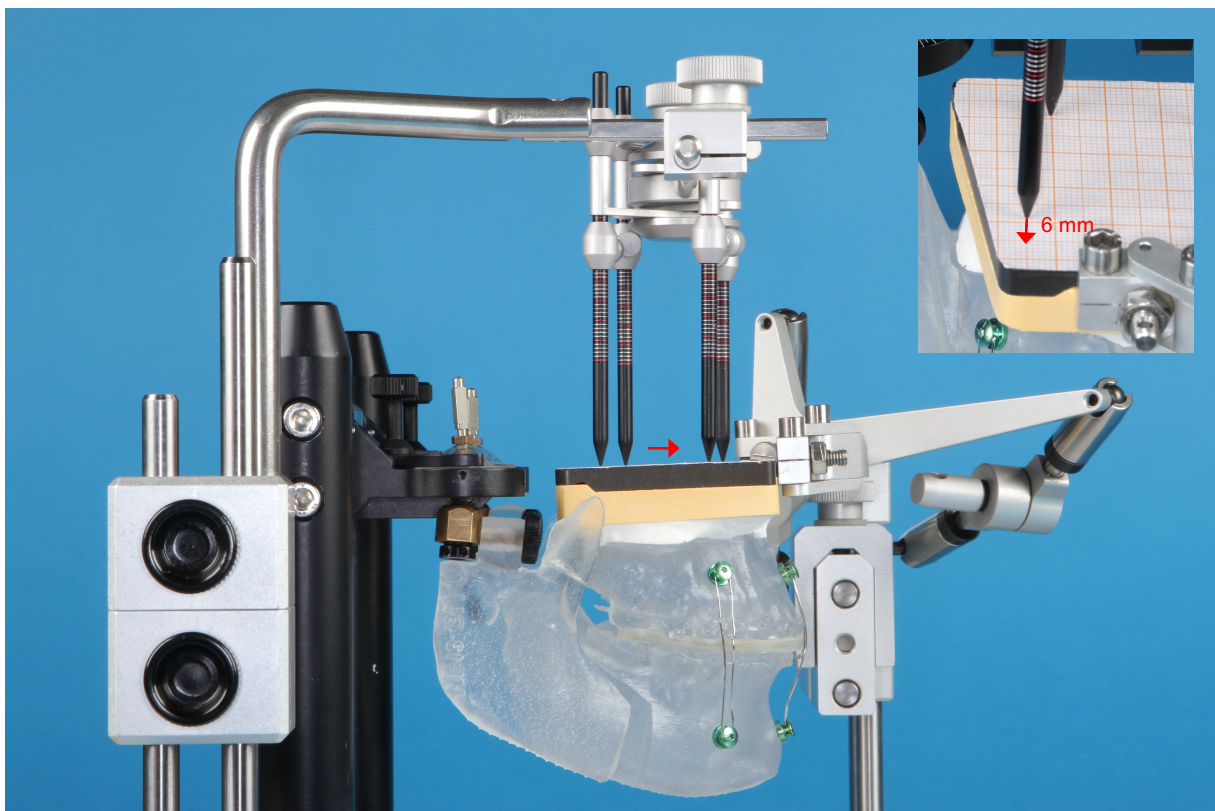


Abbildung 2.5: Darstellung des 3D-OSS von rechts: Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 6 mm (roter Pfeil). Ausschnitt oben rechts: Vorverlagerung um 6 mm.

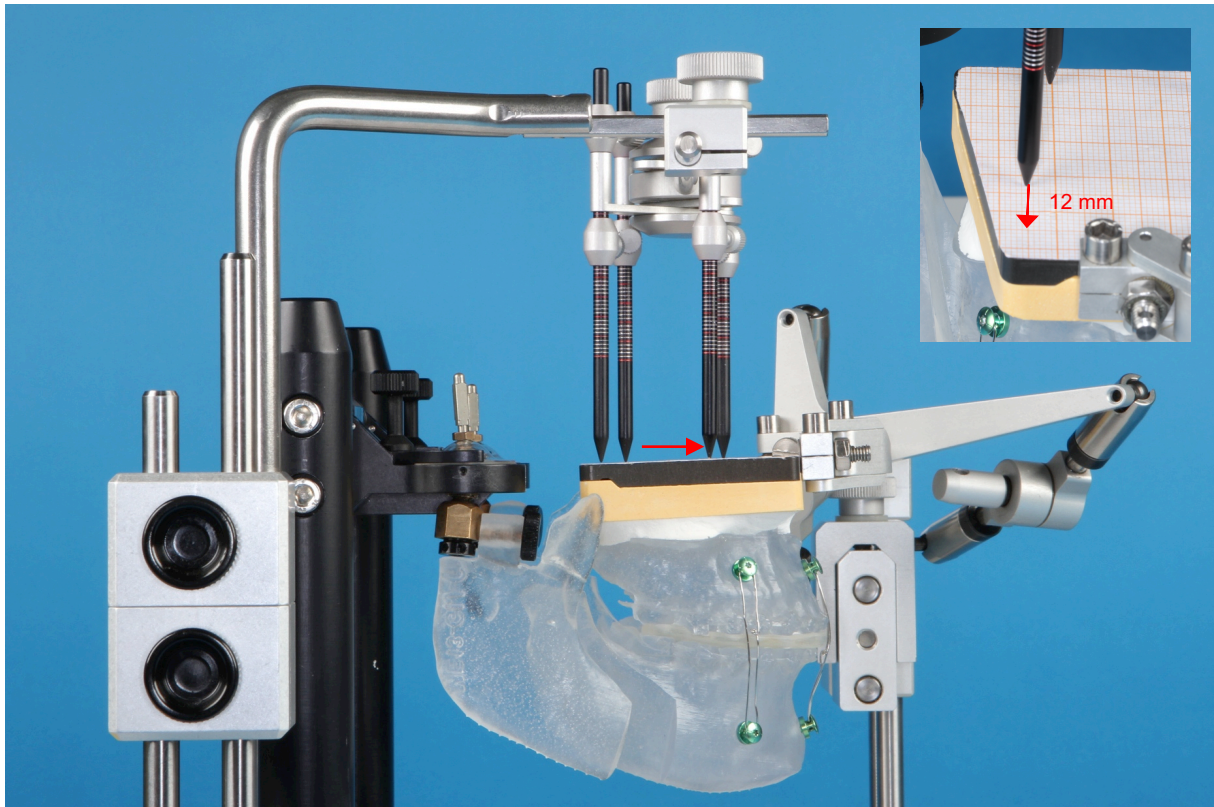


Abbildung 2.6: Darstellung des 3D-OSS von rechts: Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 12 mm (roter Pfeil). Ausschnitt oben rechts: Vorverlagerung um 12 mm

Wichtig war hierbei, dass die gelenktragenden Ramussegmente zur Rotation um die Vertikal- und die Sagittalachse an den Kondylen durch Lösen der Feststellschrauben freigegeben waren. Ausschlaggebend dafür ob eine Vor- oder eine Rückverlagerung simuliert wurde, war die jeweils tatsächlich durchgeführte Behandlung der Patienten. In 3 Fällen wurde im Rahmen einer bignathen Umstellungsosteotomie eine Vorverlagerung des Unterkiefers durchgeführt, sodass in diesen 3 Fällen im Modellversuch die inkrementelle Translation nach anterior erfolgte. In 3 Fällen wurde im Rahmen einer bignathen Umstellungsosteotomie eine Rückverlagerung des Unterkiefers durchgeführt, sodass in diesen 3 Fällen im Modellversuch die inkrementelle Translation nach posterior erfolgte.

Bei letzteren 3 Fällen war vor der Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks eine Modifikation der STL-Modelle notwendig. Der Kunststoff musste modellierend ventral der Osteotomien durch die Außenkortikalis auf das Niveau der sagittalen Osteotomiefläche reduziert werden, um eine Kollision der gelenktragenden Ramussegmente mit dieser „Stufe“ zu vermeiden (analog zu Abbildung 2.8, siehe Kapitel 2.4, S. 32).

2.4 Computertomographische Untersuchungsreihe

Um die qualitative Bewertung des bony interface im 3D-OSS Versuch in Fotoserien um einen quantitativen Aspekt zu ergänzen, sollte eine computertomographische Evaluation erfolgen. Das Hauptproblem dabei war, dass der verwendete Artikulator aus Metall bestand und in den Computertomographien Metallartefakte verursacht hätte, die eine korrekte Auswertung verhindert hätten. Daher wurde die in 2.3 beschriebene Vorgehensweise in einem selbst konstruierten metallfreien Simulator wiederholt. Dieser Simulator wurde unter der Voraussetzung der entsprechenden Präzision selbst entwickelt. Hierzu wurden unterschiedlichste metallfreie Bauteile aus handelsüblichen Baukastensätzen der Firma Fischertechnik (Waldachtal, Deutschland) und der Firma Lego (Billund, Dänemark) verwendet. Das Hauptaugenmerk wurde darauf gelegt, dass die Konstruktion identische Simulationsbewegungen des mandibulo-maxillären Blocks und der lateralen gelenktragenden Ramussegmente zuließ, ohne (metallisch - oder durch andere Werkstoffe) Artefakte hervorzurufen (Abbildung 2.7).

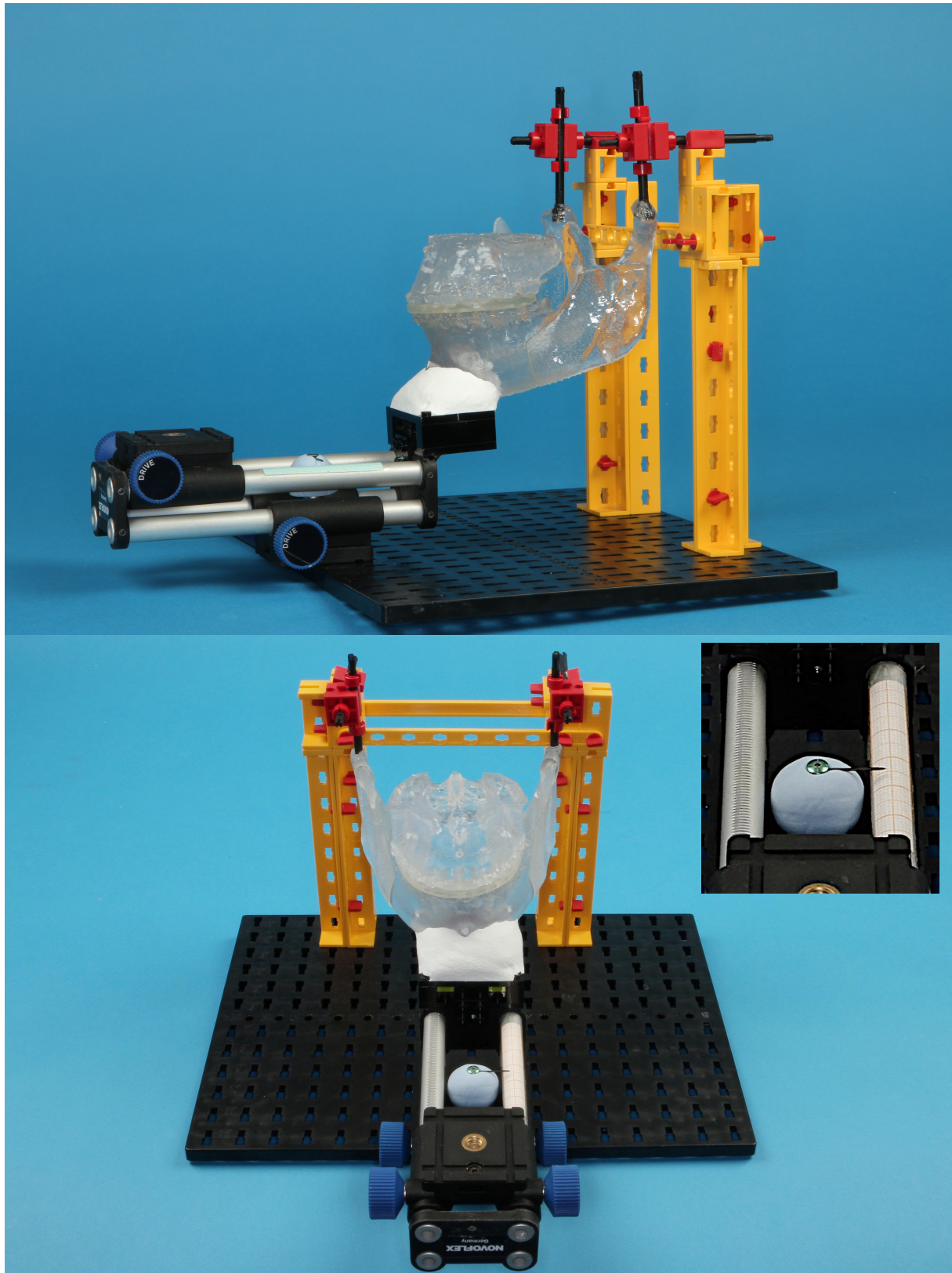


Abbildung 2.7: Selbst entwickelter Simulator für das CT mit montierten STL-Modellen (OK, interokklusaler Splint, UK und laterale gelenktragende Ramussegmente) von schräg vorne (oberes Bild) und von kranial (unteres Bild); Bodenplatte schwarz; Gerüst gelb; Verschiebetisch schwarz-silber mit Drehschraube schwarz-blau (untere) zur Verschiebung des Sockels; Millimetermaß türkis/weiß mit Zeiger darüber in blau (vgl. Ausschnitt oben rechts); Verbindungselemente zu den Kondylen rot.

Der Simulator bestand aus einer Bodenplatte auf der im hinteren Teil vertikale Stützen befestigt waren, die über eine horizontale Strebe zur Verbesserung der Stabilität miteinander verbunden wurden. Am vorderen Rand der Platte wurde mit einer Schraube ein einfacher Fotoschlitten (Firma Novoflex (Memmingen, Deutschland), Modell: „Einstellschlitten Castel-Mini“) in der Sagittalebene mittig zwischen den beiden Stützen befestigt. Dieser Fotoschlitten war das einzige metallene Bauteil des Simulators. Dies konnte jedoch in Kauf genommen werden, da er vollständig außerhalb des CT Untersuchungsbereichs lag. An diesem Fotoschlitten wurde der mandibulo-maxilläre Block aus den STL-Modellen mit Gips in der gewünschten Position befestigt. Über eine Drehschraube des Fotoschlittens ließ sich dieser Verbund bei fixierter Bodenplatte dann nach vorne und hinten bewegen. Das Ausmaß der Bewegung konnte über einen Zeiger und ein entsprechend angebrachtes Millimetermaß abgelesen werden (Abbildung 2.8 - Ausschnitt oben rechts).

Um die lateralen gelenktragenden Ramussegmente zu befestigen, wurde nach einer Bohrung in die Gelenkköpfchen von kranial jeweils ein Kunststoffstab als Halterung einpolymerisiert. Diese beiden Haltestäbe waren zu je einem weiteren sagittalen Stab und den vertikalen Stützen über zwei Verbindungselemente so angebracht, dass sowohl Translationen entlang der Sagittal-, Transversal-, und Vertikalachse, als auch Rotationen um die Vertikal- und Sagittalachse möglich waren. Die gelenktragenden Ramussegmente konnten also vor Versuchsbeginn durch Verschiebung in allen drei Raumebenen in der Ausgangsposition positioniert werden. Anschließend konnte diese Ausgangsposition mit Stopps versiegelt und Translationsbewegungen blockiert werden, um nur noch Rotationsbewegungen zuzulassen.

Bei Fällen mit Rückverlagerung, war bereits im 3D-OSS Versuch vor der Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks eine Modifikation der STL-Modelle erfolgt (vergleiche S. 28). Der Kunststoff wurde modellierend ventral der Osteotomien durch die Außenkortikalis auf das Niveau der sagittalen Osteotomiefläche reduziert, um eine Kollision der gelenktragenden Ramussegmente mit dieser „Stufe“ zu vermeiden (Abbildung 2.8).

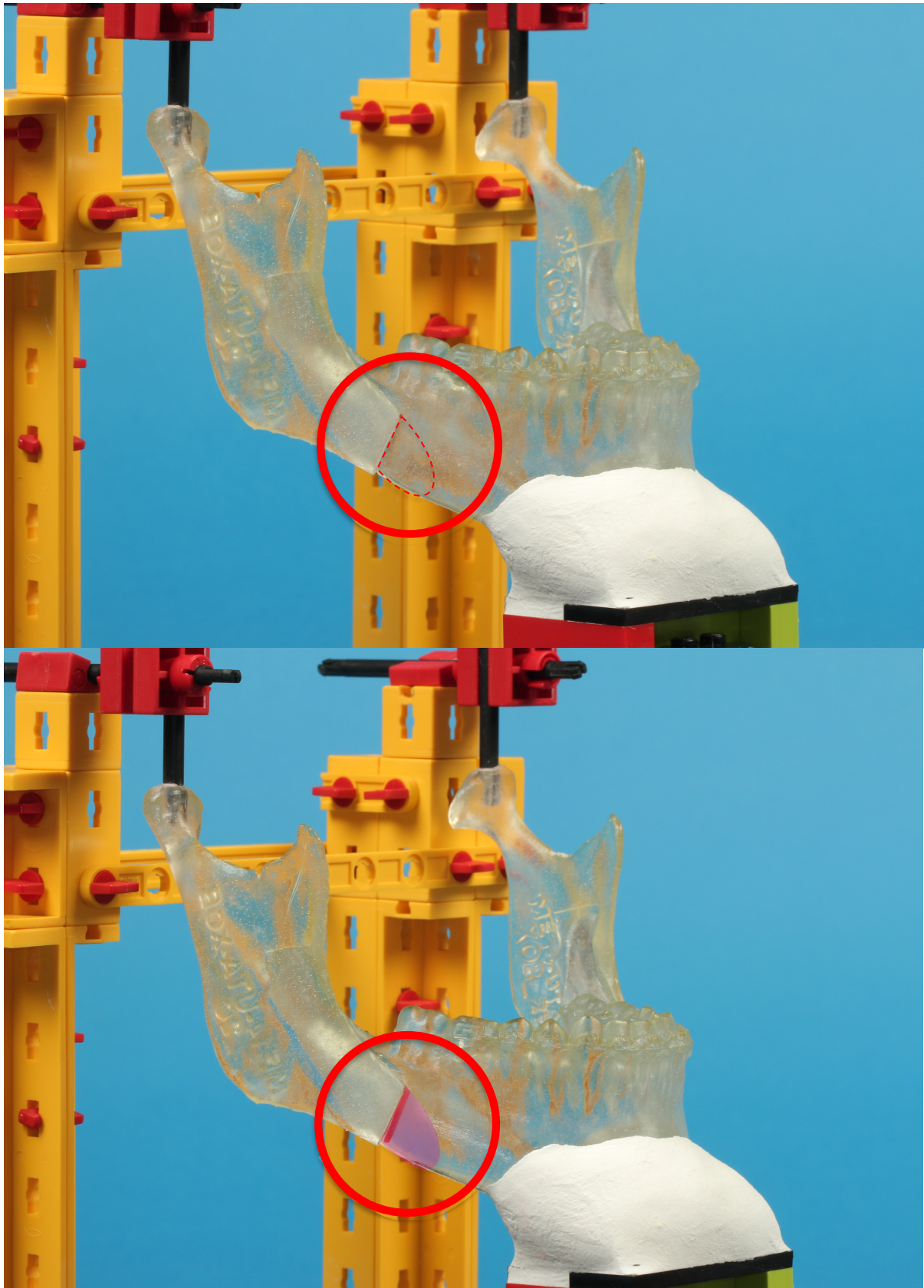


Abbildung 2.8: Modellierende Abtragung anterior der vestibulären Kortikotomie (rote Kreise). Oben Areal vor Abtragung (Umriss gestrichelt); unten Areal nach Abtragung (rosarot eingefärbt) zur Nivellierung mit der lateralen Schnittfläche der UK-Spange.

Die CT-Aufnahmen erfolgten in der Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München. Gewählt wurde eine Schichtdicke von 625 µm und einer Fensterung von -1024 HE bis 3071 HE (Hounsfield-Einheiten).

In der ersten CT- Untersuchungsreihe wurde eine computergestützte Bestimmung der Kontakte und Dimensionsänderungen im bony interface der STL-Modelle durch anteriore oder posteriore Verlagerung des mandibulo-maxillären Blocks bei fixierter originärer Gelenkposition und Freigabe der Rotation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um die vertikale und sagittale Gelenkachse durchgeführt, indem in jeder Translationsposition (0 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm) eine CT Aufnahme erfolgte (Abbildung 2.9).



Abbildung 2.9: Der Simulator mit montierten STL-Modellen (OK, interokklusaler Splint, UK und laterale gelenktragende Ramussegmente) in der „0 mm“ Ausgangsposition (links) und nach Vorverlagerung der UK-Spange um 12 mm (rechts) (roter Pfeil).

In der zweiten CT- Untersuchungsreihe wurden in jeder Translationsposition (0 mm - 12 mm) die lateralen gelenktragenden Ramussegmente - nach Freigabe der Gelenkposition (durch Entfernung der Verbindungselemente) - an die Unterkieferspange so adaptiert, dass sich die Lücke im bony interface schloss (Abbildung 2.10). Jede Vorwärts-Rückwärts Position wurde danach erneut im CT aufgenommen. Die Befestigung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente an der Unterkieferspange erfolgte mit herkömmlichem Klebewachs.

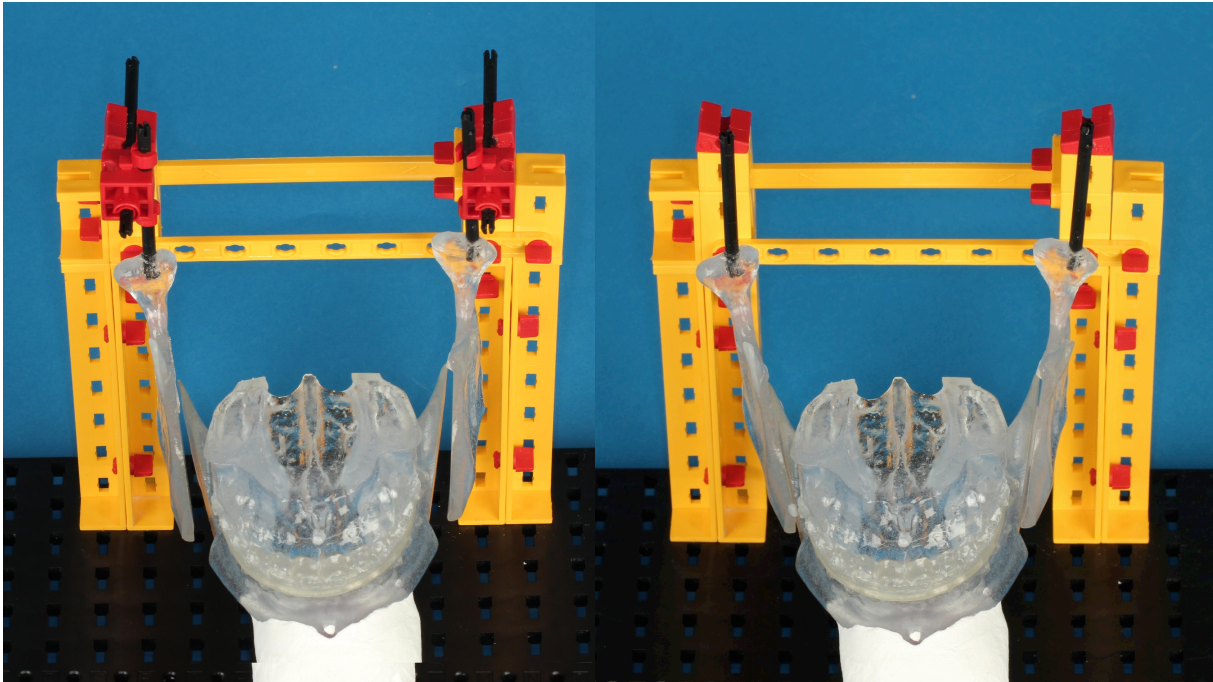


Abbildung 2.10: links: Lückenbildung zwischen der Unterkieferspange und den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten nach Vorverlagerung der UK-Spange 12mm; rechts: Freigabe der Kondylen (durch Entfernung der Verbindungselemente) und Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente an das mediale Segment.

Durch die Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente sollte eine intraoperative forcierte Fixierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente an der Mandibula und die entsprechende Auswirkung auf die Kondylen simuliert werden. Es wurden 6 Fälle (3 mit Translation nach anterior, 3 mit Translation nach posterior) mittels CT-Untersuchungsreihe untersucht (vgl. Tabelle 2.1). Bei den 6 Fallserien mit jeweils 20 Positionen wurden insgesamt 120 Computertomogramme aufgenommen.

2.4.1 3D-Form Analyse des bony interface in Geomagic Qualify 2012

Nach Herstellung der Computertomographien wurden mittels der Software InVesalius 3.0 (Firma CTI, Campinas, Brasilien) (Abbildung 2.11) die DICOM Daten in STL Oberflächendateien umgewandelt (Fensterung: -302 HE bis 1933 HE) welche in das 3D Verarbeitungsprogramm Geomagic Qualify 2012 (Firma 3D Systems, Rock Hill, South Carolina, USA) importiert werden konnten (Abbildung 2.12).

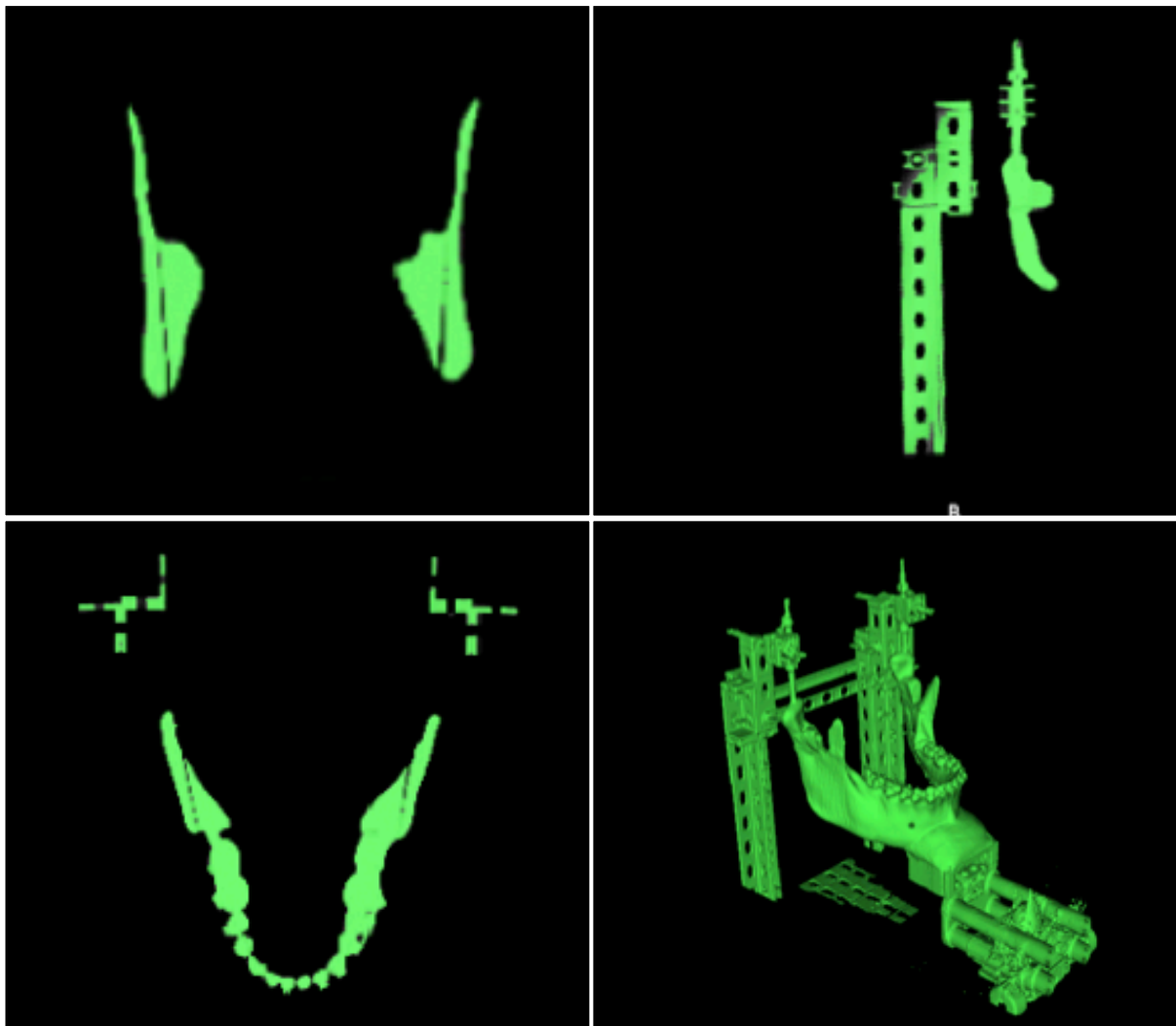


Abbildung 2.11: Umwandlung der DICOM Daten in STL Oberflächendateien in der Software Invesalius 3.0: Links oben (coronal), rechts oben (sagittal) und links unten (axial) jeweils 2D Darstellung der Schichtbilder aus den Computertomographien. Rechts unten die von der Software daraus errechnete STL Oberflächendatei in 3D Darstellung.

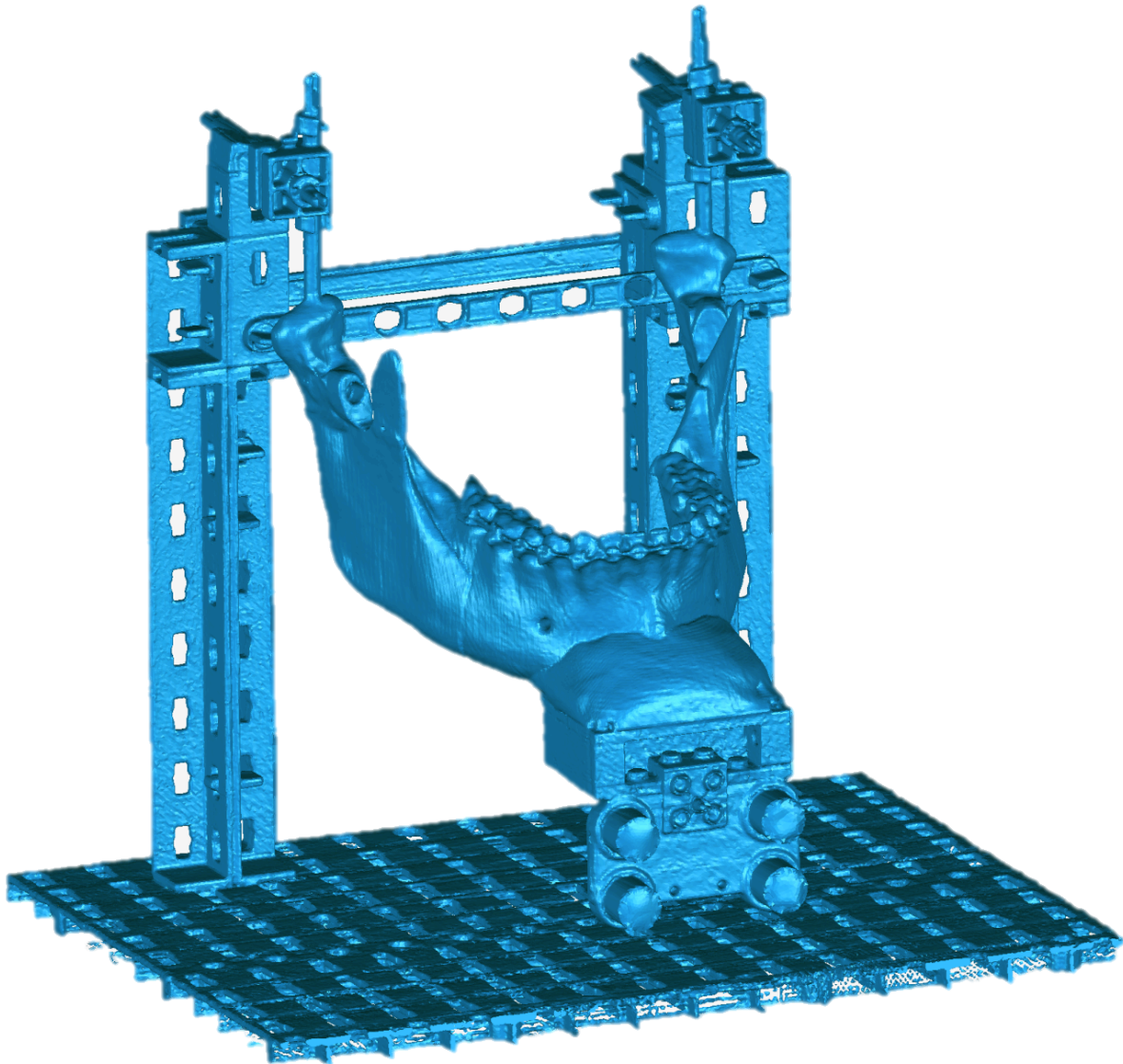


Abbildung 2.12: Der Simulator in 3D Darstellung in der Software Geomagic Qualify 2012 in der „0 mm“ Ausgangsposition ohne Knochenlücken

Mit der Software Geomagic Qualify 2012 konnten die geometrischen Veränderungen im bony interface und deren Auswirkungen auf die Kondylen digital dargestellt und visuell veranschaulicht werden. Die Verwendung von STL Oberflächendateien erlaubte es, die Begrenzungen der Knochenlücken durch Verbindung korrespondierender Referenzpunkte zu einer geometrischen Form zu verbinden (Abbildung 2.13) und diese dadurch in dreidimensionaler Form als 3D Körper darzustellen (Abbildung 2.14). Somit stellen die daraus entstandenen 3D Körper eine Art „Ausguss“ der infolge der Verschiebungen entstehenden Knochenlücken dar.

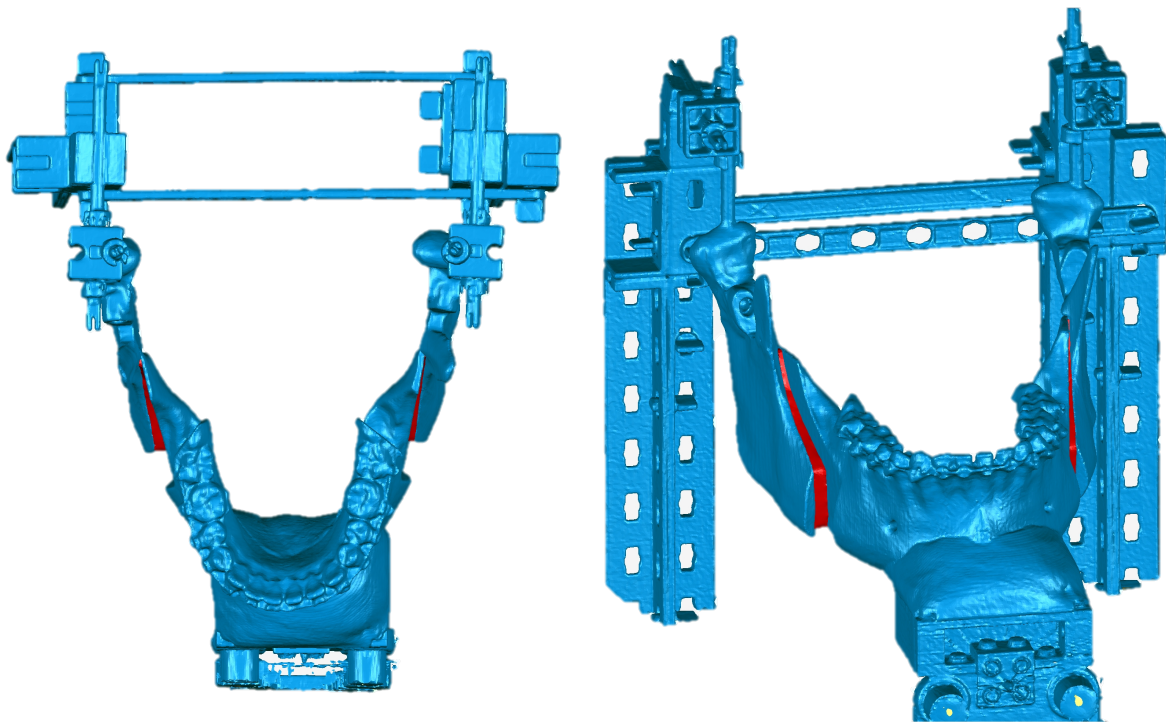


Abbildung 2.13 Darstellung des Simulators mit Lückenbildung nach 12 mm Vorverlagerung: Der Simulator und die eingebauten Modelle in blau. Die eigentlichen Knochenlücken wurden durch Verbindung korrespondierender Referenzpunkte zu 3D Körpern geformt, die eine Art „Ausguss“ der Knochenlücken darstellen (rot); links Ansicht von kranial; rechts Ansicht von schräg vorne.



Abbildung 2.14: Detailansicht des in Abbildung 2.13 in rot dargestellten 3D Körpers aus dem bony interface rechts.

2.4.2 Metrische Vermessung des bony interface in VoXim

Während die Software Geomagic Qualify 2012 durch die Darstellung der Daten in dreidimensionaler Form gut zur Visualisierung des bony interface geeignet war, ergaben sich mit dieser Software für die genaue und vor allem reproduzierbare Vermessung der geometrischen Beziehungen zwischen den Segmenten Schwierigkeiten. Obwohl die in Geomagic Qualify 2012 verwendeten STL Oberflächendateien die geometrische Konfiguration der Oberflächen wiedergaben, bereitete es Probleme Referenzpunkte für die 3D Vermessung zu finden, die sich innerhalb der jeweiligen Versuchsreihe reproduzierbar definieren ließen.

Deshalb erfolgte eine weitere Auswertung der CT-Daten in der Software VoXim (IVS Technology GmbH, Chemnitz, Deutschland), die von der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universität Freiburg (Direktor: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Rainer Schmelzeisen) freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde. Die Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Marc Christian Metzger (Leitender Oberarzt). Diese Software erlaubt die Verarbeitung von Schichtbilddaten aus CT oder MRT für Diagnose und Therapieplanung.

Der Vorteil der Software VoXim ist, dass direkt mit den im CT erstellten DICOM Datensätzen gearbeitet werden kann (Abbildung 2.15). VoXim gestattet die gleichzeitige Betrachtung beziehungsweise Bearbeitung der Daten in coronaler, axialer und sagittaler Schichtung (d.h. multiplanar), sowie eine errechnete dreidimensionale Darstellung auf dem Monitorbild. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Software das Erstellen von Messschablonen (sogenannte „Templates“) erlaubt. Diese Messschablonen können dann zur Messung der jeweils gleichen Parameter bei allen unterschiedlichen Translationspositionen der jeweiligen Versuchsreihe verwendet werden und erlauben somit eine reproduzierbare Vermessung.

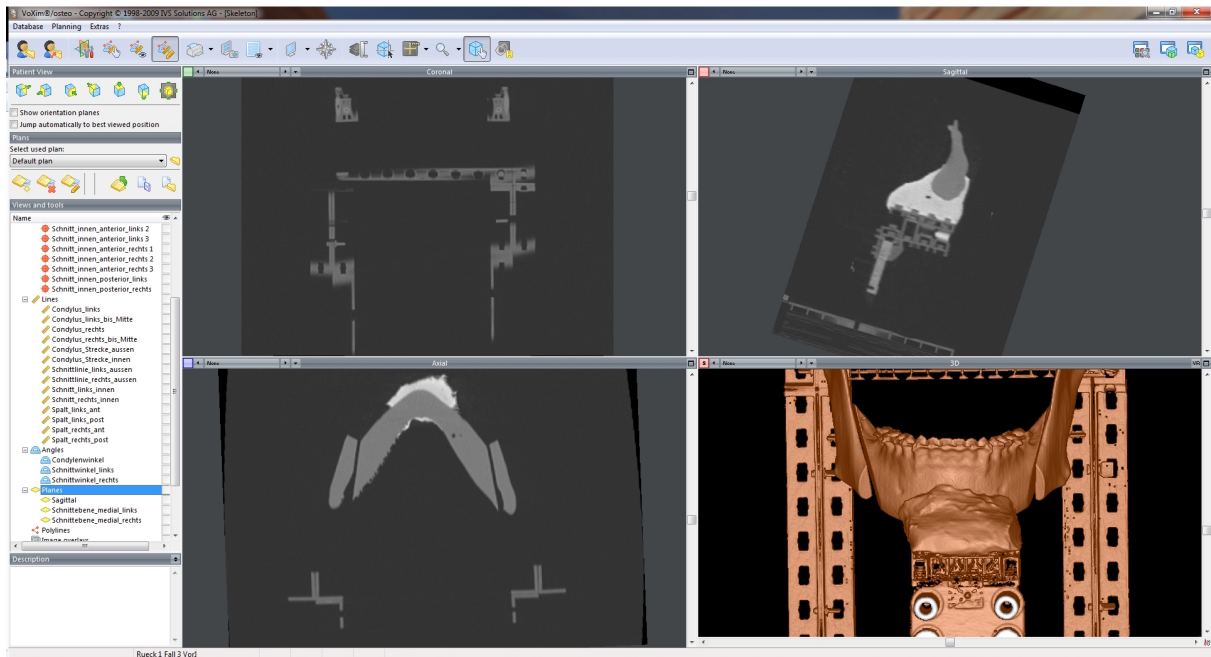


Abbildung 2.15: Arbeitsoberfläche und unterschiedliche Darstellungsebenen in VoXim: Es ist die gleichzeitige Betrachtung beziehungsweise Bearbeitung der Daten in coronaler (links oben), sagittaler (rechts oben) und axialer (links unten) Schichtung, sowie einer errechnete dreidimensionale Darstellung (rechts unten) möglich.

Das Ziel der Verarbeitung in VoXim war eine reproduzierbare Vermessung der in den Simulator eingebauten Stereolithographiemodelle, um die während der Vorwärts-Rückwärts Verlagerung im bony interface entstehenden Veränderungen quantifizieren zu können.

Hierfür wurden für jeden der 6 Datensätze in jeder der jeweils 20 verschiedenen Positionen (2x10 bei inkrementeller Vor-, beziehungsweise Rückverlagerung in den Positionen 0 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm jeweils mit und ohne Freigabe der Kondylen bei forcierter Anlage der lateralen gelenktragenden Ramussegmente) eine Reihe von Bezugspunkten am Modell definiert. Durch die Definition immer gleichbleibender Bezugspunkte am Modell konnten entsprechende Translationen dieser Bezugspunkte entlang der x-, y- und z-Achse des Koordinatensystems innerhalb der Vor- oder Rückverlagerungssequenzen gemessen werden. Wenn sich also derselbe Bezugspunkt am Modell nach (beispielsweise) einer Vorverlagerung der UK-Spange an einem anderen Ort als in Position 0 mm befand, konnte diese Lageänderung durch die Software als Distanz gemessen werden. Der Vorteil der Software VoXim, im Vergleich zu Geomagic Qualify 2012, war es, dass die Bezugspunkte anhand der 2-dimensionalen Schnittbilder gesetzt und überprüft werden konnten. Somit konnte

beispielsweise der Bezugspunkt CLA (siehe unten) einfach und präzise in der axialen Schichtung gesucht und markiert werden, in der sagittalen Schichtung gegebenenfalls minimal korrigiert und anschließend in der 3-dimensionalen Darstellung nochmals abschließend kontrolliert werden.

Zur Vermessung der Modelle bei Vor- und Rückverlagerungen wurden insgesamt 16 Bezugspunkte verwendet (Tabelle 2.2 - Tabelle 2.4, Abbildung 2.16 - Abbildung 2.21). Davon befanden sich 8 auf den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten (davon 4 auf den Kondylen) und 8 auf dem medialen Segment.

Bezugspunkte der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (Tabelle 2.2, Abbildung 2.16):

Bezugspunkte der lateralen gelenktragenden Ramussegmente	
Bezugspunkt	Definition
Schnitt_außen_anterior_links (SAAL)	ventro-kaudalster Bezugspunkt der medialen Schnittfläche des linken lateralen gelenktragenden Ramussegments
Schnitt_außen_anterior_rechts (SAAR)	ventro-kaudalster Bezugspunkt der medialen Schnittfläche des rechten lateralen gelenktragenden Ramussegments
Schnitt_außen_posterior_links (SAPL)	dorso-kränialster Bezugspunkt der medialen Schnittfläche des linken lateralen gelenktragenden Ramussegments
Schnitt_außen_posterior_rechts (SAPR)	dorso-kränialster Bezugspunkt der medialen Schnittfläche des rechten lateralen gelenktragenden Ramussegments

Tabelle 2.2: Definition und Akronyme (in Klammern) der in der Software VoXim verwendeten Bezugspunkte der lateralen gelenktragenden Ramussegmente zur Vermessung des bony interface

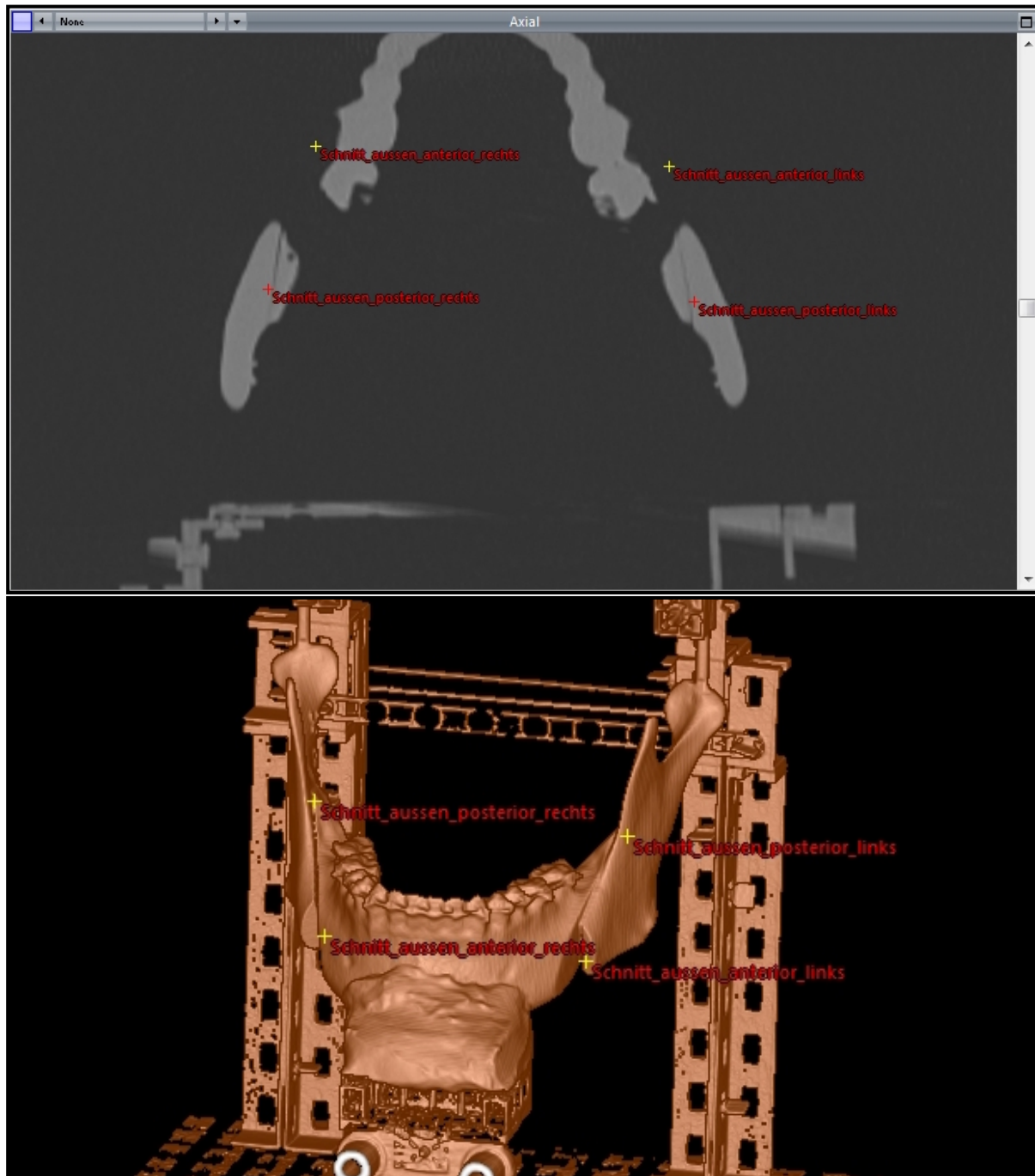


Abbildung 2.16: Darstellung der Bezugspunkte der lateralen gelenktragenden Ramussegmente: Bezugspunkte SAAL, SAAR, SAPL und SAPR aus Tabelle 2.2 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht. (Da die Punkte SAAL und SAPR in einer anderen Schicht als SAPL und SPAR liegen, sind sie in der axialen Darstellung nicht zu sehen). Beachte: Die abgebildeten Bezugspunkte in der 3D Ansicht gelten nur der Orientierung, da sie auch in einer „tieferen“ Schicht gelegen und von einer davor liegenden Struktur überlagert sein können.

Bezugspunkte der Gelenkköpfchen (Tabelle 2.3, Abbildung 2.17):

Bezugspunkte der Gelenkköpfchen	
Bezugspunkt	Definition
Condylus_links_außen (CLA)	lateralster Bezugspunkt des linken Kondylus
Condylus_rechts_außen (CRA)	lateralster Bezugspunkt des rechten Kondylus
Condylus_links_innen (CLI)	medialster Bezugspunkt des linken Kondylus
Condylus_rechts_innen (CRI)	medialster Bezugspunkt des rechten Kondylus

Tabelle 2.3: Definition und Akronyme (in Klammern) der in der Software VoXim verwendeten Bezugspunkte der Gelenkköpfchen zur Vermessung des bony interface

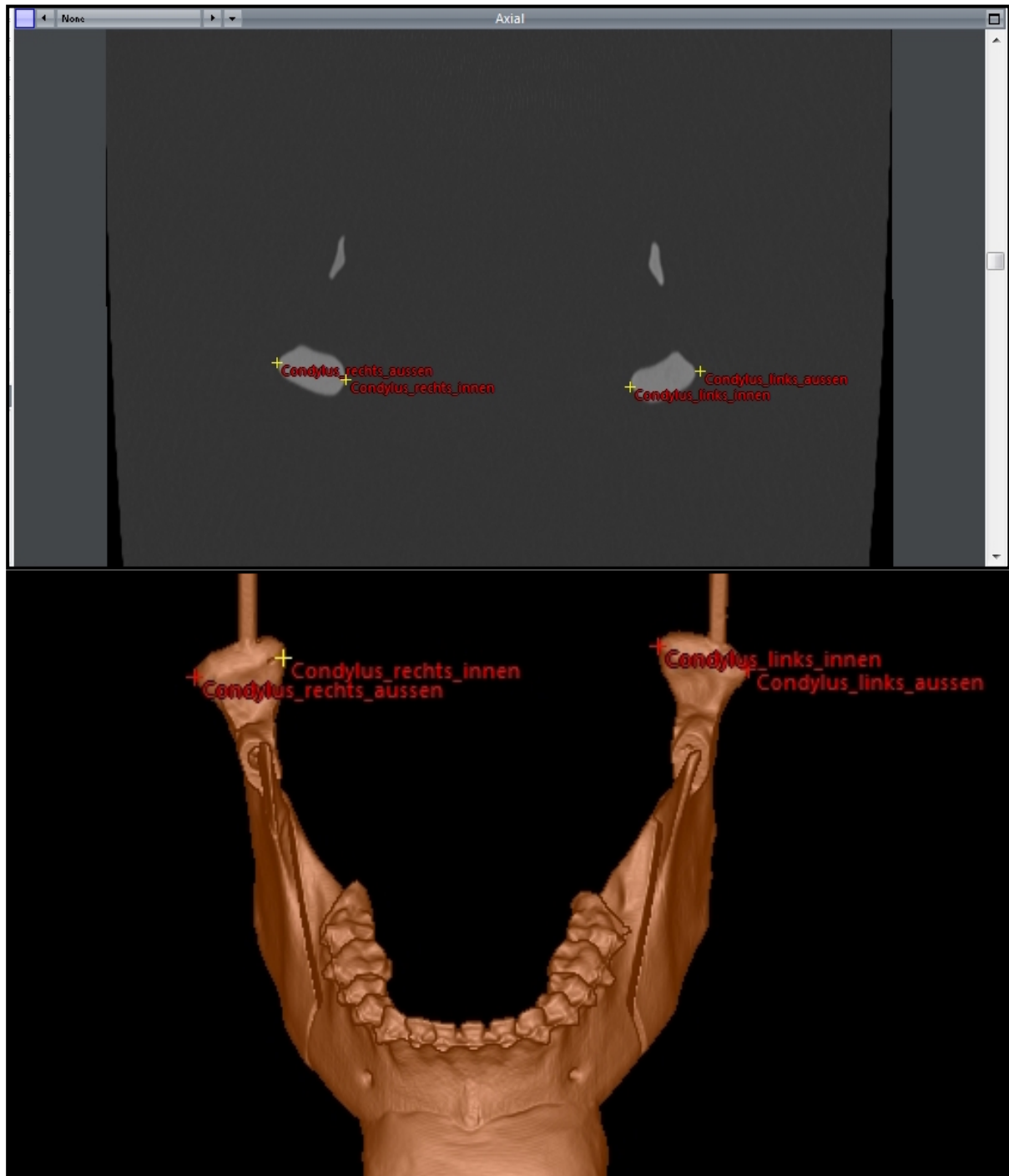


Abbildung 2.17: Darstellung der Bezugspunkte der Gelenkköpfchen: Bezugspunkte CLA, CLI, CRA und CRI aus Tabelle 2.3 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht.

Bezugspunkte des medialen Segments (Tabelle 2.4, Abbildung 2.18 - Abbildung 2.20):

Bezugspunkte des medialen Segments	
Bezugspunkt	Definition
Schnitt_innen_anterior_links 1 (SIAL1)	ventro-kaudalster Bezugspunkt der lateralen Schnittfläche des medialen Segments links
Schnitt_innen_anterior_links 2 (SIAL2)	mittig auf der lateralen Schnittfläche des medialen Segments links gelegener Bezugspunkt
Schnitt_innen_anterior_links 3 (SIAL3)	weiter posterior auf der lateralen Schnittfläche des medialen Segments links gelegener Bezugspunkt
Schnitt_innen_anterior_rechts 1 (SIAR1)	ventro-kaudalster Bezugspunkt der lateralen Schnittfläche des medialen Segments rechts
Schnitt_innen_anterior_rechts 2 (SIAR2)	mittig auf der lateralen Schnittfläche des medialen Segments rechts gelegener Bezugspunkt
Schnitt_innen_anterior_rechts 3 (SIAR3)	weiter posterior auf der lateralen Schnittfläche des medialen Segments links gelegener Bezugspunkt
Schnitt_innen_posterior_links (SIPL)	dorso-kranialster Bezugspunkt der lateralen Schnittfläche des medialen Segments links
Schnitt_innen_posterior_rechts (SIPR)	dorso-kranialster Bezugspunkt der lateralen Schnittfläche des medialen Segments rechts

Tabelle 2.4: Definition und Akronyme (in Klammern) der in der Software VoXim verwendeten Bezugspunkte des medialen Segments zur Vermessung des bony interface

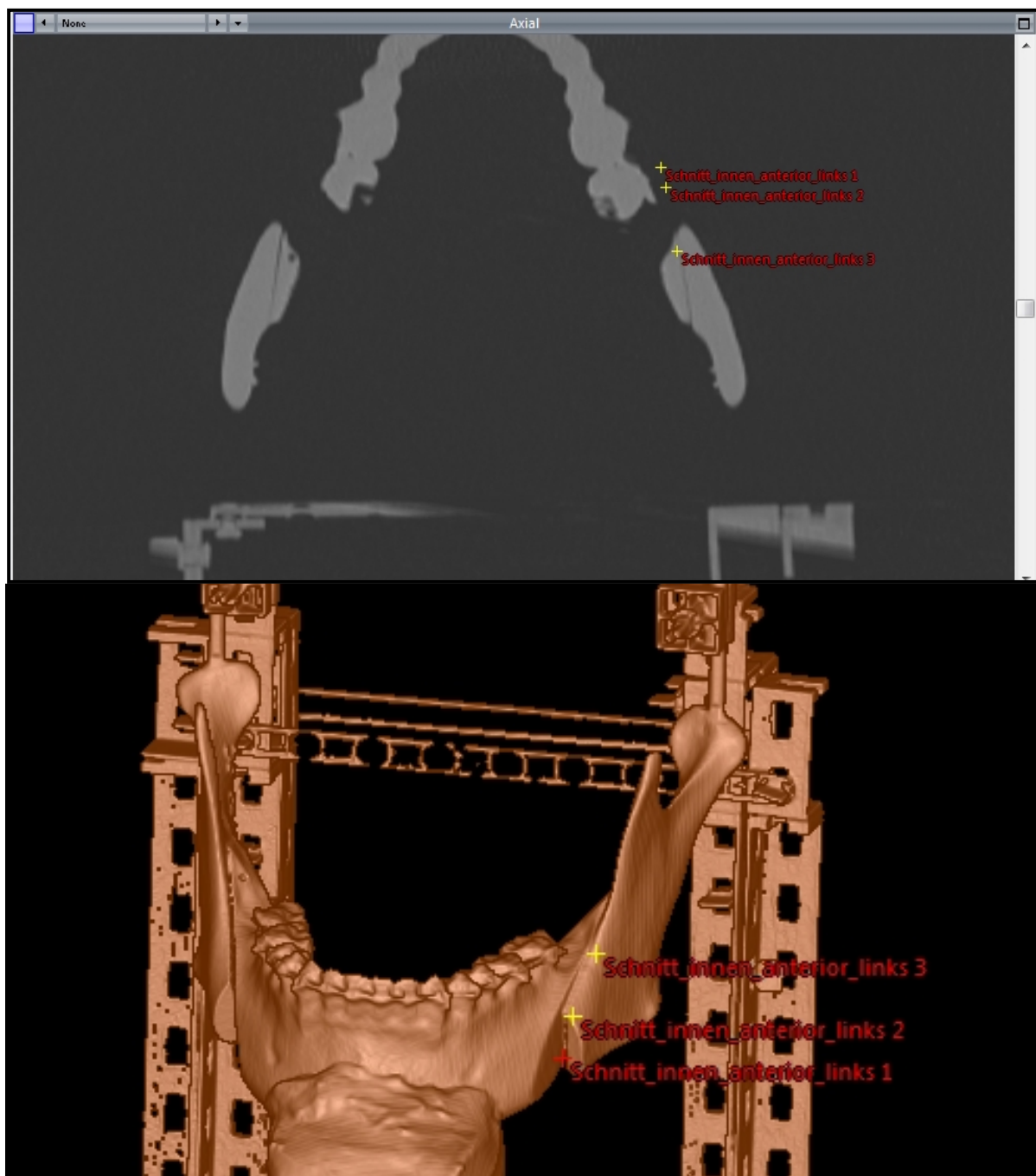


Abbildung 2.18: Darstellung der Bezugspunkte des medialen Segments: Bezugspunkte SIAL1, SIAL2 und SIAL3 aus Tabelle 2.4 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht

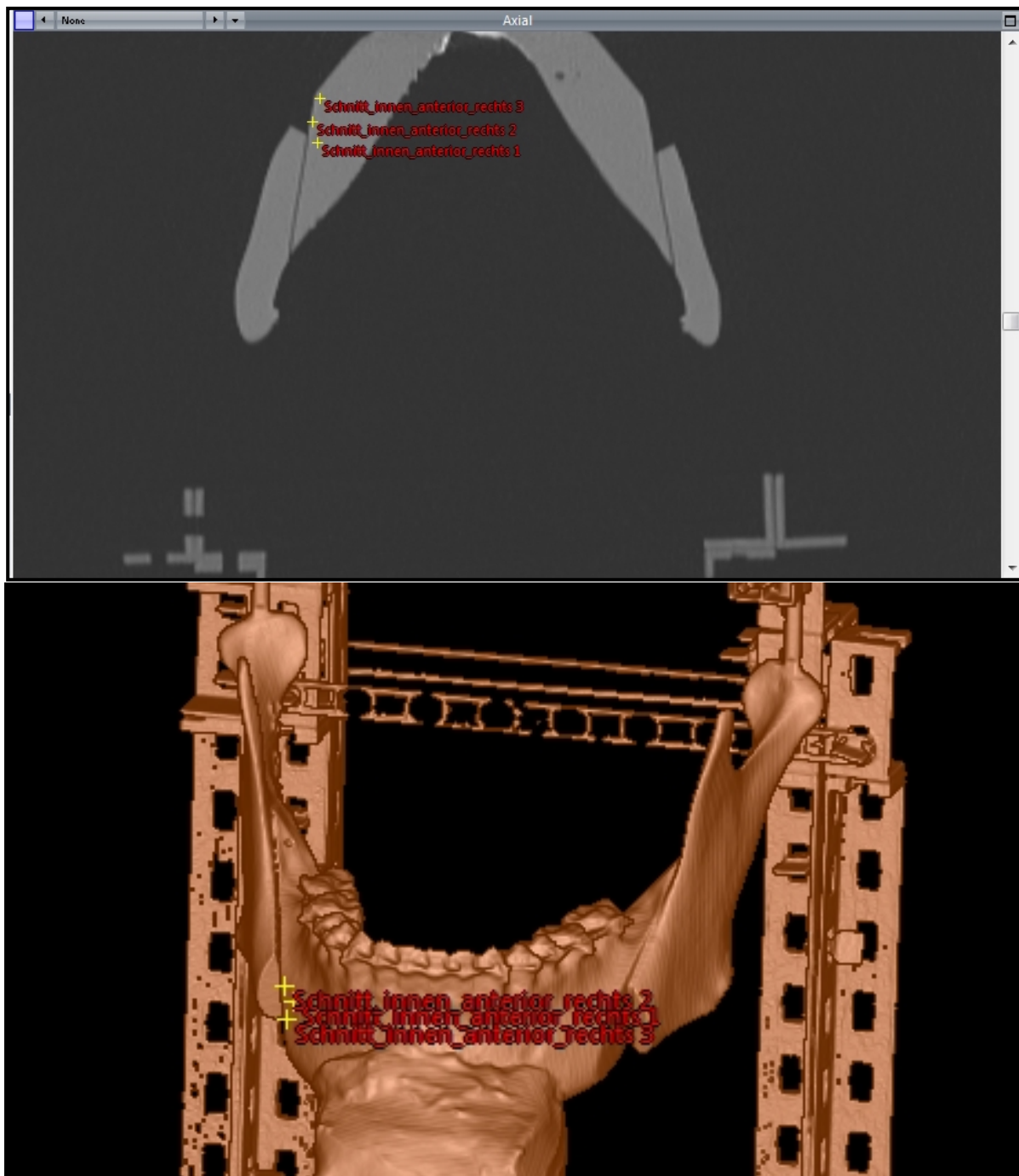


Abbildung 2.19: Darstellung der Bezugspunkte des medialen Segments: Bezugspunkte SIAR1, SIAR2 und SIAR3 aus Tabelle 2.4 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht

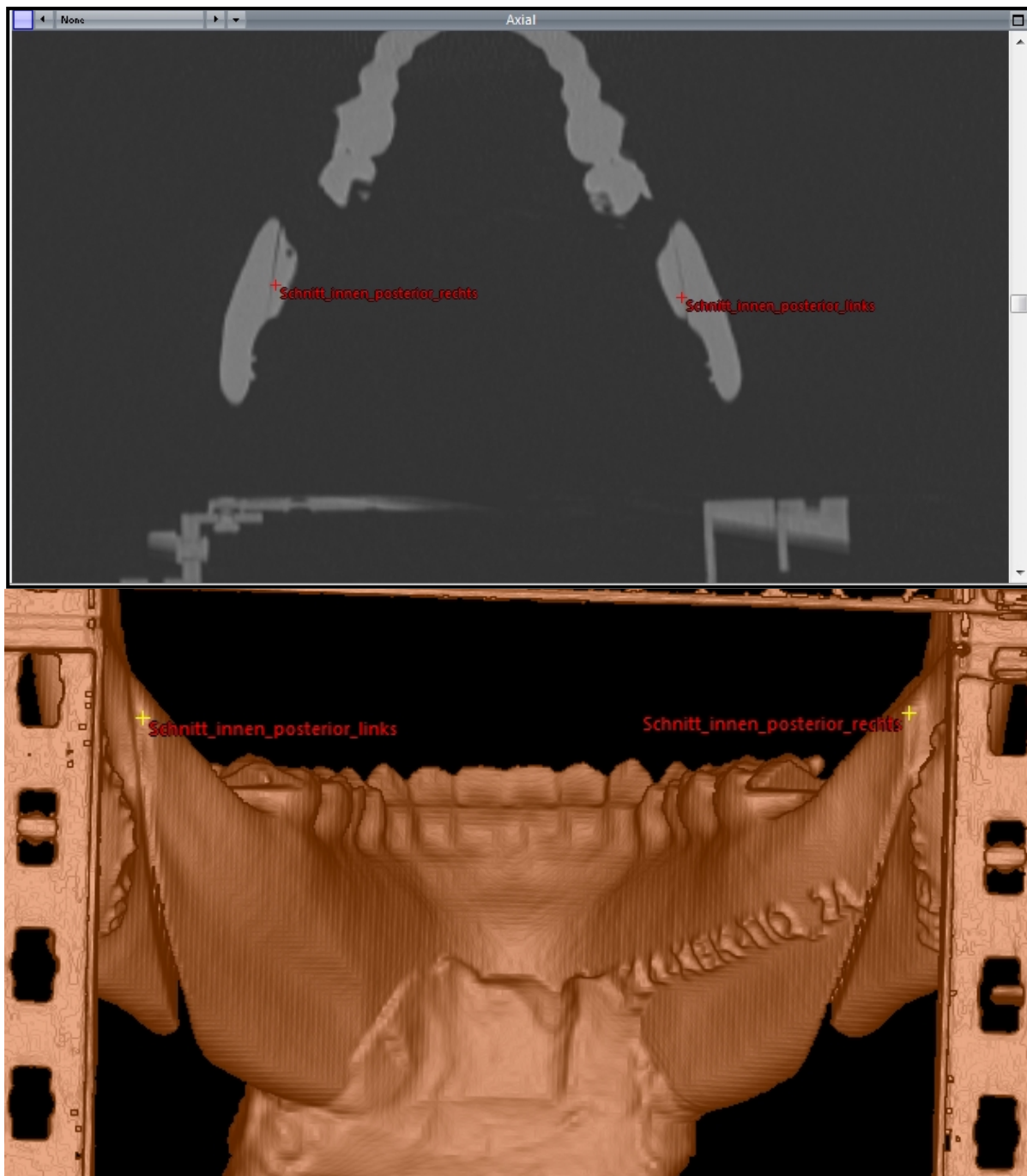


Abbildung 2.20: Darstellung der Bezugspunkte des medialen Segments: Bezugspunkte SIPL und SPIR aus Tabelle 2.4 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht

Die Abbildung 2.21 zeigt eine Übersicht über alle 16 definierten Bezugspunkte aus Tabelle 2.2 - 2.4 in VoXim.

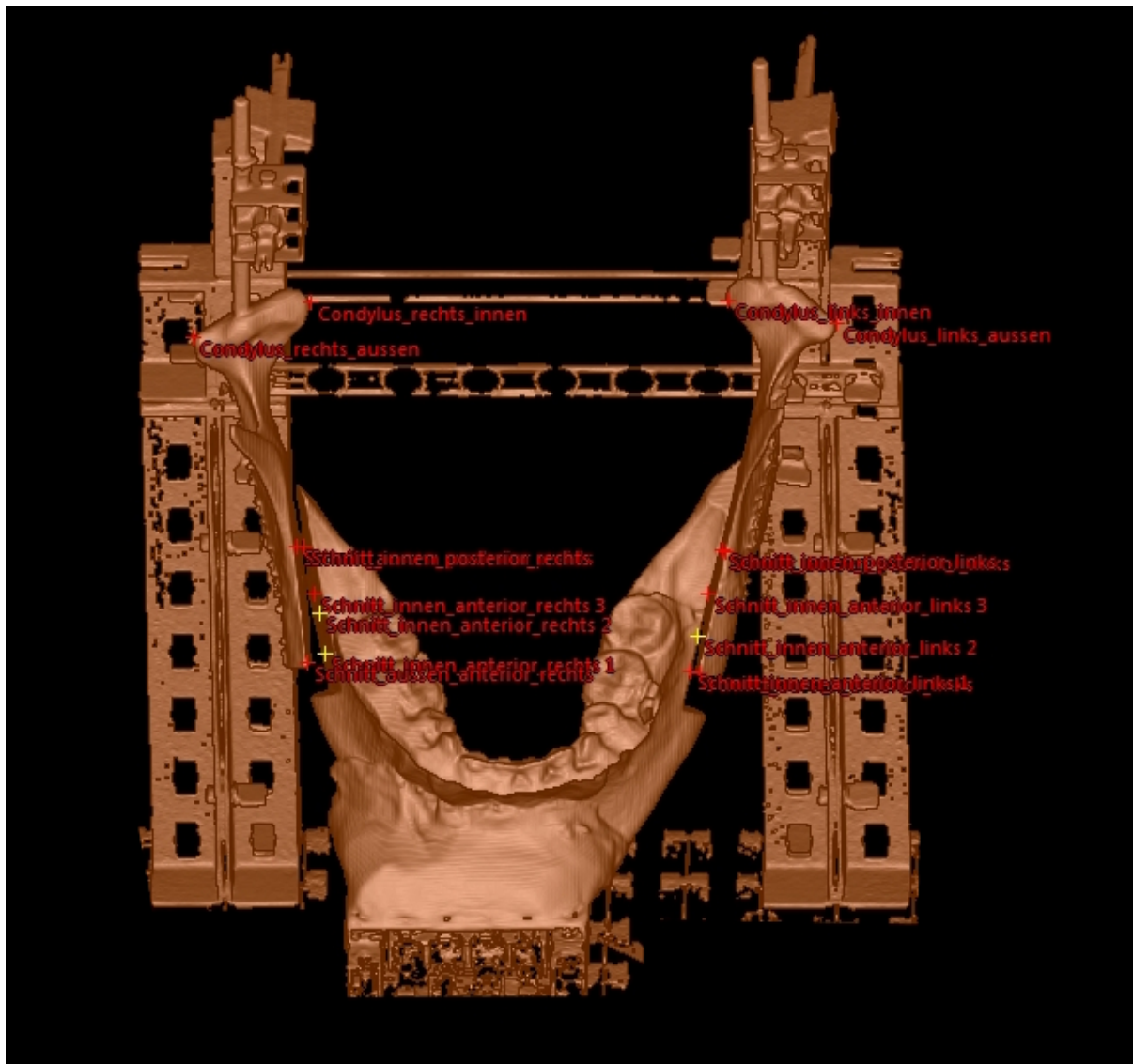


Abbildung 2.21: Darstellung aller 16 definierten Bezugspunkte aus Tabelle 2.2 - Tabelle 2.4 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht. Auf den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten befinden sich jeweils 4 Bezugspunkte (davon jeweils 2 auf den Kondylen) und 8 auf dem medialen Segment (die Beschriftungen sind teilweise überlagert). Beachte: Die abgebildeten Bezugspunkte in der 3D Ansicht gelten nur der Orientierung, da sie auch in einer „tieferen“ Schicht gelegen und von einer davor liegenden Struktur überlagert sein können.

Für die jeweiligen Positionen bei freigegebenen Kondylen und adaptierten lateralen gelenktragenden Ramussegmenten wurden nur die ersten 4 Bezugspunkte verwendet (Tabelle 2.2), da es hier sinnvoll war lediglich die Änderungen der Gelenkkopfstellung zu untersuchen, denn die Lücke im bony interface, für dessen

Vermessung die übrigen 12 Punkte notwendig gewesen wären, war (durch Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente) geschlossen.

Mit Hilfe der Bezugspunkte (Tabelle 2.2) konnten weitere geometrische Parameter wie Bezugslinien, Bezugsstrecken, Bezugsebenen/Bezugsflächen und Bezugswinkel konstruiert werden (Tabelle 2.5 - Tabelle 2.7, Abbildung 2.22 - Abbildung 2.24). Eine Strecke konnte zum einen zwischen zwei Punkten gebildet werden. Zum anderen konnte eine Strecke auch zwischen einem Punkt und einer Ebene/Fläche, als senkrecht auf dieser Ebene stehende Verbindung konstruiert werden (z.B. die „Knochenlückenbreiten“ siehe Tabelle 2.5 und Kapitel 2.4.2.2). Zur Definition einer Ebene wurden 3 Punkte benötigt, die diese im Raum ausrichteten. Ein Winkel konnte in VoXim zwischen zwei Strecken oder zwei Ebenen/Flächen gebildet werden. Die folgenden Bezugsstrecken wurden definiert (Tabelle 2.5, Abbildung 2.22):

Strecke	Definition
Kondylenachse links	Strecke zwischen CLA - CLI
Kondylenachse rechts	Strecke zwischen CRA - CRI
Interkondylardistanz außen	Strecke zwischen CLA - CRA
Interkondylardistanz innen	Strecke zwischen CLI - CRI
Schnittlinie links außen	Strecke zwischen SAAL - SAPL
Schnittlinie rechts außen	Strecke zwischen SAAR - SAPR
Schnittlinie links innen	Strecke zwischen SIAL1 - SIPL
Schnittlinie rechts innen	Strecke zwischen SIAR1 - SIPR
Knochenlückenbreite links anterior	Strecke zwischen SAAL - Schnittfläche links innen (als Senkrechte auf der Schnittfläche)
Knochenlückenbreite rechts anterior	Strecke zwischen SAAR - Schnittfläche rechts innen (als Senkrechte auf der Schnittfläche)
Knochenlückenbreite links posterior	Strecke zwischen SAPL - Schnittfläche links innen (als Senkrechte auf der Schnittfläche)

Knochenlückenbreite rechts posterior	Strecke zwischen SAPR - Schnittfläche rechts innen (als Senkrechte auf der Schnittfläche)
--------------------------------------	---

Tabelle 2.5: Definition der in der Software VoXim verwendeten Bezugsstrecken zur Vermessung des bony interface

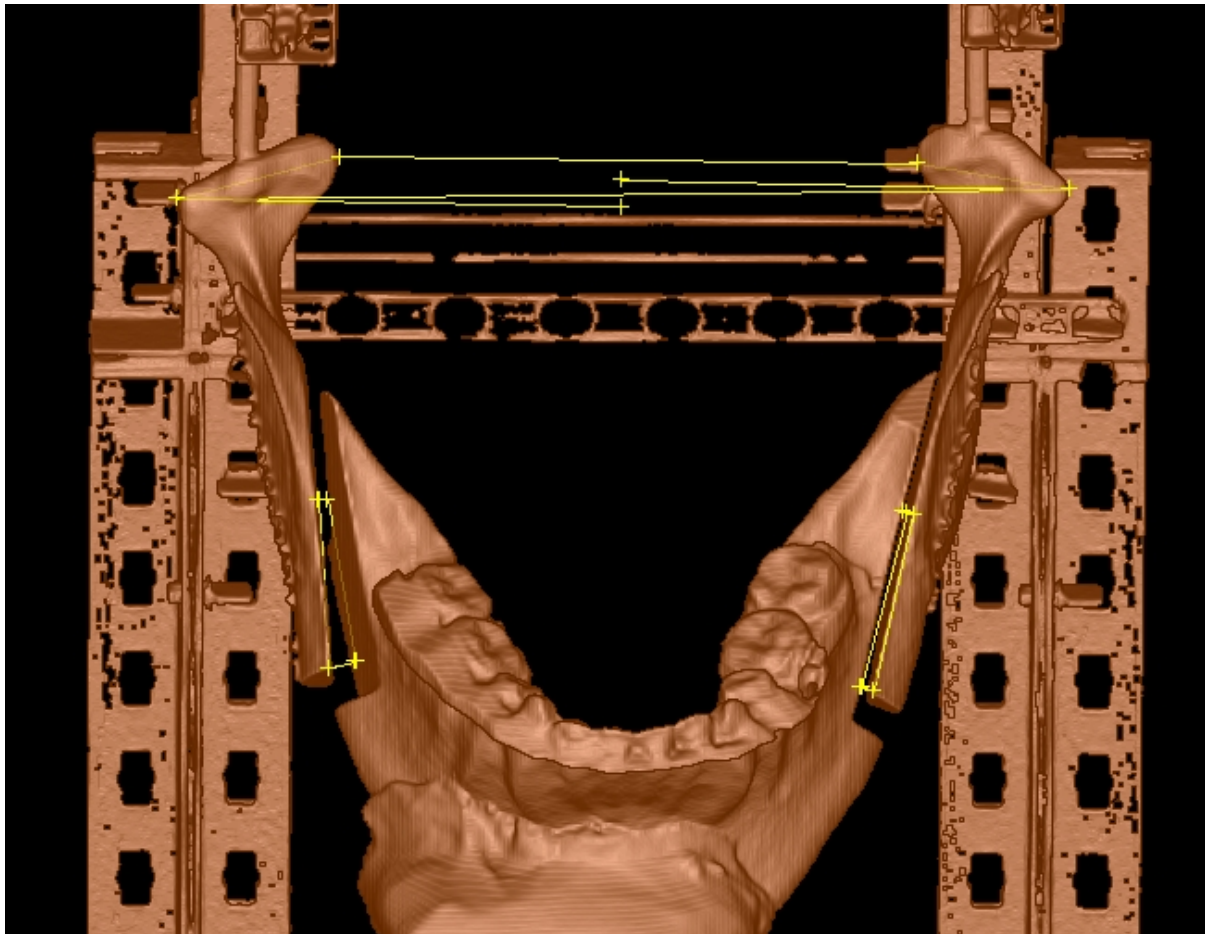


Abbildung 2.22: Darstellung der definierten Bezugsstrecken (in gelb) aus Tabelle 2.5 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht: An den Kondylen sind die jeweiligen Kondylenachsen und zwischen den Kondylen die „Interkondylardistanz“ innen und außen (mittige Markierung entspricht der Sagittalebene) zu erkennen. Im Osteotomiespalt sind die „Schnittlinien“ und die „Knochenlückenbreiten“ dazwischen dargestellt.

Die folgenden Bezugswinkel wurden definiert (Tabelle 2.6, Abbildung 2.23):

Winkel	Definition
Interkondylarwinkel	Winkel zwischen Kondylenachse links - Kondylenachse rechts
Knochenlückenöffnungswinkel links	Winkel zwischen Schnittlinie links innen - Schnittlinie links außen
Knochenlückenöffnungswinkel rechts	Winkel zwischen Schnittlinie rechts innen - Schnittlinie rechts außen

Tabelle 2.6: Definition der in der Software VoXim verwendeten Bezugswinkel zur Vermessung des bony interface

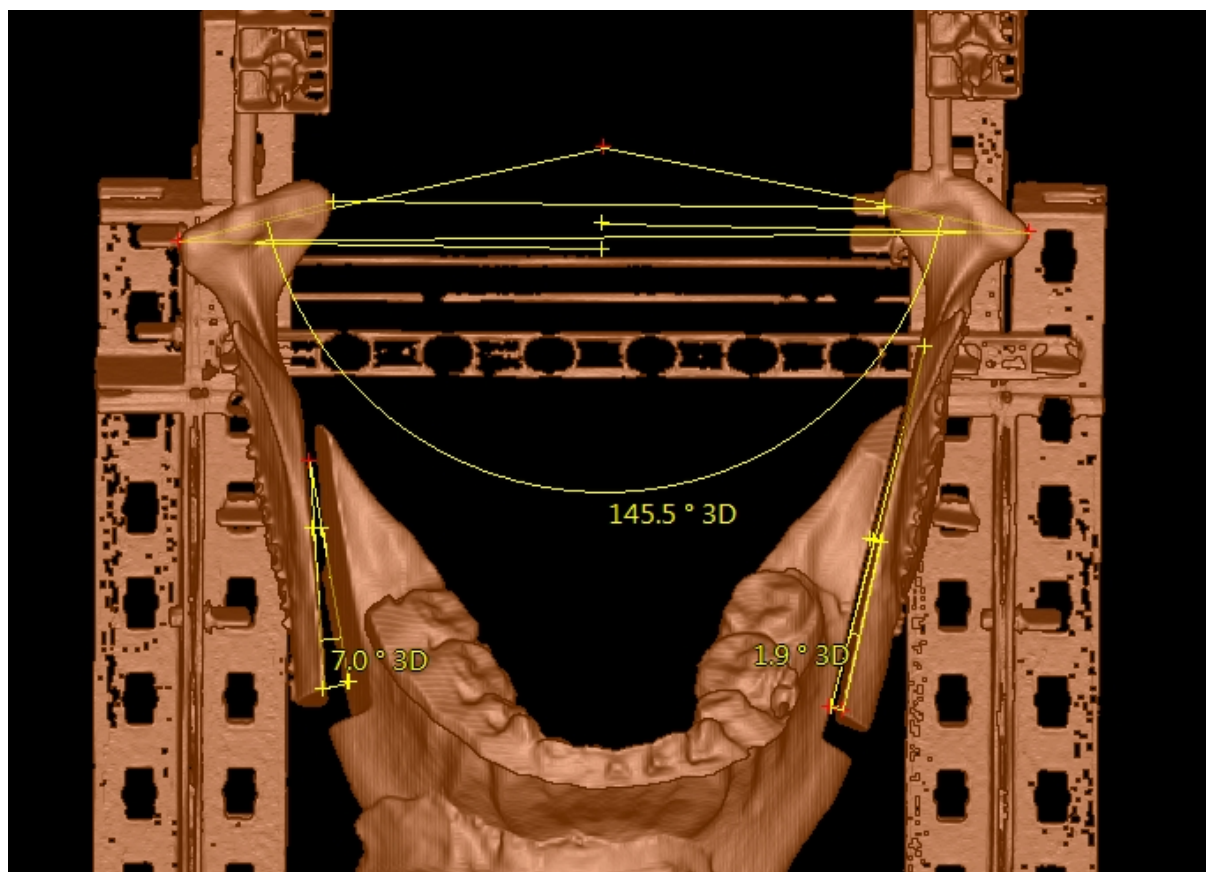


Abbildung 2.23: Darstellung der definierten Bezugswinkel (in gelb) aus Tabelle 2.6 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht: Zwischen den Kondylenachsen ist der „Interkondylarwinkel“ zu erkennen (Bogen zwischen den Kondylenachsen, zur besseren Veranschaulichung mit einem Wert (145,5°) beschriftet.). Im Osteotomiespalt sind die „Knochenlückenöffnungswinkel“ dargestellt (zur besseren Veranschaulichung mit Werten (7,0° rechts und 1,9° links) beschriftet). Außerdem sind zwischen den Kondylen die „Interkondylardistanz“ und in den Osteotomiespalten die „Knochenlückenbreiten“ abgebildet.

Die folgenden Bezugsebenen/Bezugsflächen wurden definiert (Tabelle 2.7, Abbildung 2.24):

Ebene/Fläche	Definition
Schnittfläche links innen	Laterale Schnittfläche des medialen Segments links (definiert durch SIAL1, SIAL2 und SIAL3)
Schnittfläche rechts innen	Laterale Schnittfläche des medialen Segments rechts (definiert durch SIAR1, SIAR2 und SIAR3)

Tabelle 2.7: Definition der in der Software VoXim verwendeten Bezugsebenen/Bezugsflächen zur Vermessung des bony interface

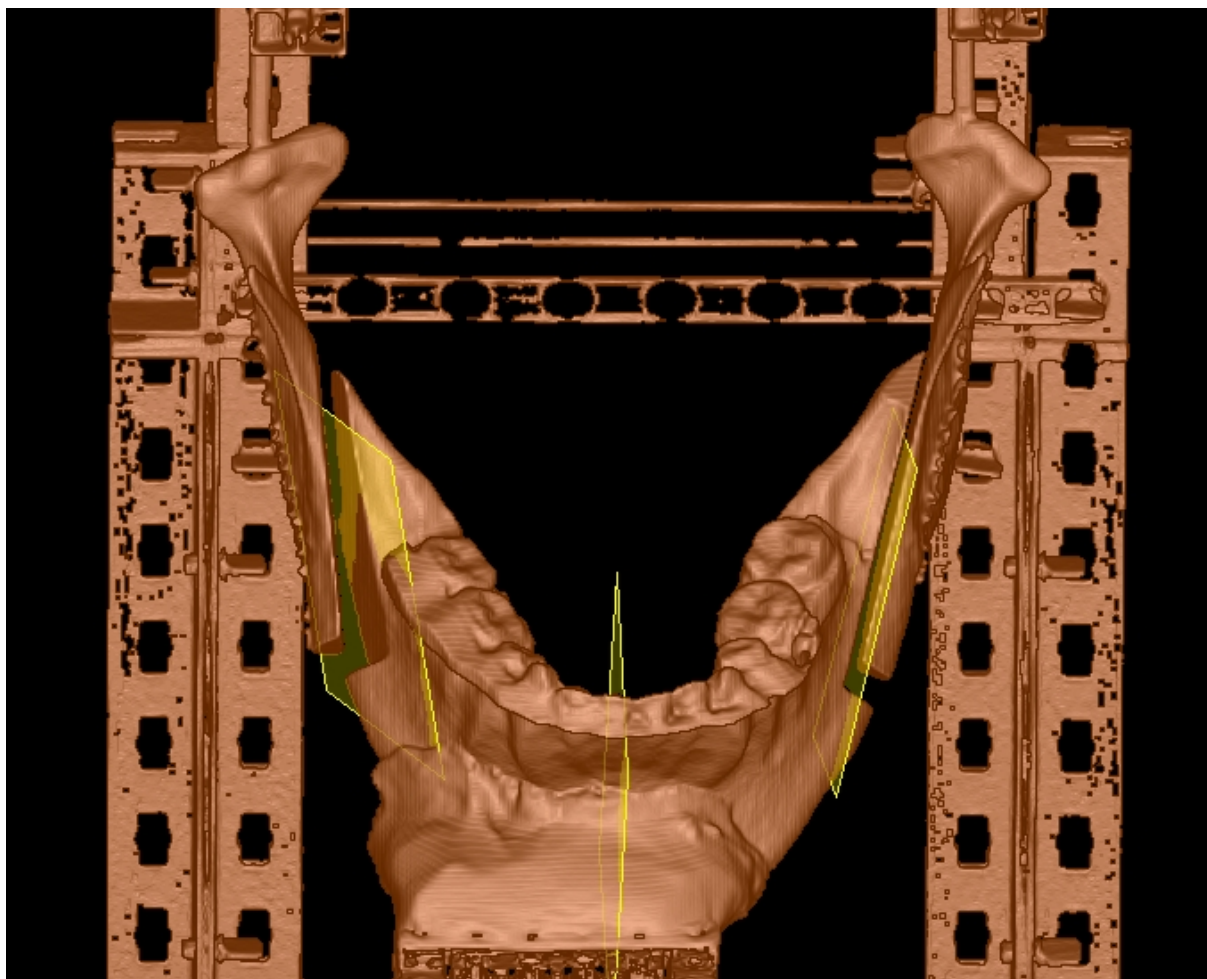


Abbildung 2.24: Darstellung der definierten Bezugsebenen/Bezugsflächen (in gelb) aus Tabelle 2.7 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht: rechts und links sind die „Schnittflächen“ zu erkennen, die Ebene in der Mitte entspricht der Sagittalebene (Ansicht leicht von rechts exzentrisch).

Die verschiedenen Distanzen und Winkel konnten schließlich zur Vermessung der folgenden 4 Parameter verwendet werden (Abbildung 2.23).

2.4.2.1 Knochenlückenöffnungswinkel

Der Knochenlückenöffnungswinkel repräsentierte den Winkel zwischen den lateralen Schnittflächen des medialen Segments und den medialen Schnittflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente jeweils für die rechte und linke Seite. Gemessen wurde er aus dem Winkel zwischen Bezugsstrecken auf den inneren (Schnittlinie links innen / Schnittlinien rechts innen) und den äußeren Schnittflächen (Schnittlinien links außen / Schnittlinien rechts außen).

2.4.2.2 Knochenlückenbreite

Die Knochenlückenbreite wurde jeweils am anterioren und posterioren Rand der Anlagerungsflächen und für links und rechts separat gemessen.

Die Knochenlückenbreite wurde hierbei als Distanz zwischen einem Punkt und der Ebene/Fläche, als eine senkrecht stehende Verbindung, gemessen (vergleiche S. 49 f.).

Die anteriore Knochenlückenbreite ergab sich aus der Distanz zwischen dem ventro-kaudalsten Bezugspunkt der medialen Schnittflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (SAAL links / SAAR rechts) und den lateralen Schnittflächen des medialen Segments (Schnittfläche links innen / Schnittfläche rechts innen).

Die posteriore Knochenlückenbreite ergab sich aus der Distanz zwischen dem dorso-kranialsten Bezugspunkt der medialen Schnittflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (SAPL links / SAPR rechts) und den lateralen Schnittflächen des medialen Segments (Schnittfläche links innen / Schnittfläche rechts innen).

2.4.2.3 Interkondylarwinkel

Der Interkondylarwinkel bildete sich zwischen der rechten und linken Kondylenachse und wurde sowohl bei fixierter Kondylenposition, also bei Lückenbildung im bony interface durch Vor- oder Rückverlagerung (nicht angelegten lateralen gelenktragenden Ramussegmenten), als auch bei freigegebener Kondylenposition (angelegten lateralen gelenktragenden Ramussegmenten) gemessen

2.4.2.4 Interkondylardistanz

Die Interkondylardistanz bildete sich aus der Distanz zwischen den korrespondierenden linken und rechten Kondylusbezugspunkten und wurde ebenfalls für nicht angelegte und angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente bestimmt. Außerdem wurde sie in eine äußere und innere Interkondylardistanz unterteilt, welche sich aus der Verbindung der jeweils lateralsten beziehungsweise der jeweils medialsten Punkte der Gelenkköpfchen ergab. Da sich daraus jedoch keine relevanten Unterschiede ergaben, wurde im Folgenden nur die äußere Interkondylardistanz verwendet.

Nachdem einmalig ein Template mit allen oben genannten Bezugspunkten, Bezugsstrecken, Bezugswinkeln und Bezugsebenen erstellt wurde, konnte diese Vorlage auf jede der verschiedenen „Vorwärts-Rückwärts“ Positionen des mandibulo-maxillären Blocks im Simulator angewandt werden. Nach dem Anbringen der Bezugspunkte berechnet die Software automatisch die gesuchten Distanzen und Winkel in der jeweiligen Vor- oder Rückverlagerungsposition (Abbildung 2.25). Diese Werte konnten anschließend in Microsoft Excel exportiert und dort tabellarisiert und grafisch dargestellt werden.

Name	X	Y	Z	3D	X	Y	Z	3D	Extra value	Description
Points										
Schnitt_innen_posterior_rechts	194.1 mm	150.6 mm	125.2 mm		42.2 mm right	44.2 mm anterior	19.9 mm superior			
Schnitt_innen_posterior_links	110.9 mm	154.0 mm	119.6 mm		41.3 mm left	41.7 mm anterior	19.9 mm superior			
Schnitt_innen_anterior_rechts 3	185.1 mm	184.3 mm	154.4 mm		32.6 mm right	82.5 mm anterior	2.8 mm inferior			
Schnitt_innen_anterior_rechts 2	186.7 mm	178.0 mm	151.5 mm		34.4 mm right	77.7 mm anterior	2.2 mm superior			
Schnitt_innen_anterior_rechts 1	185.9 mm	182.7 mm	145.3 mm		33.2 mm right	73.3 mm anterior	4.1 mm inferior			
Schnitt_innen_anterior_links 3	112.9 mm	163.8 mm	127.6 mm		39.4 mm left	52.3 mm anterior	12.8 mm superior			
Schnitt_innen_anterior_links 2	115.4 mm	176.0 mm	137.4 mm		37.1 mm left	65.2 mm anterior	4.1 mm superior			
Schnitt_innen_anterior_links 1	116.9 mm	185.0 mm	138.9 mm		36.0 mm left	69.4 mm anterior	4.1 mm inferior			
Schnitt_aussen_posterior_rechts	195.9 mm	150.5 mm	125.3 mm		44.0 mm right	44.2 mm anterior	19.9 mm superior			
Schnitt_aussen_posterior_links	109.5 mm	154.1 mm	119.5 mm		42.6 mm left	41.7 mm anterior	19.9 mm superior			
Schnitt_aussen_anterior_rechts	186.9 mm	182.7 mm	145.4 mm		34.2 mm right	73.4 mm anterior	4.1 mm inferior			
Schnitt_aussen_anterior_links	115.3 mm	185.0 mm	138.7 mm		37.6 mm left	69.2 mm anterior	4.1 mm inferior			
Condylus_rechts_innen	196.5 mm	120.8 mm	95.9 mm		45.0 mm right	7.1 mm anterior	39.2 mm superior			
Condylus_rechts_aussen	214.9 mm	120.4 mm	98.5 mm		63.4 mm right	9.0 mm anterior	39.2 mm superior			
Condylus_links_innen	106.5 mm	123.1 mm	91.1 mm		45.1 mm left	5.2 mm anterior	40.9 mm superior			
Condylus_links_aussen	88.4 mm	123.5 mm	94.1 mm		63.1 mm left	8.6 mm anterior	42.5 mm superior			
Lines										
Spalt_rechts_post	1.6 mm	0.4 mm	0.1 mm	1.6 mm	1.6 mm left	0.2 mm posterior	0.4 mm superior	1.6 mm		
Spalt_rechts_ant	1.0 mm	0.2 mm	0.0 mm	1.0 mm	0.9 mm left	0.1 mm posterior	0.2 mm superior	1.0 mm		
Spalt_links_post	1.3 mm	0.2 mm	0.1 mm	1.3 mm	1.3 mm right	0.2 mm posterior	0.1 mm superior	1.3 mm		
Spalt_links_ant	1.5 mm	0.2 mm	0.1 mm	1.5 mm	1.5 mm right	0.2 mm posterior	0.1 mm superior	1.5 mm		
Schnitt_rechts_innen	8.2 mm	32.1 mm	20.1 mm	38.8 mm	9.0 mm right	29.1 mm posterior	23.9 mm superior	38.8 mm		
Schnitt_links_innen	6.1 mm	31.0 mm	19.3 mm	37.0 mm	5.2 mm left	27.7 mm posterior	23.9 mm superior	37.0 mm		
Schnittlinie_rechts_aussen	9.0 mm	32.2 mm	20.2 mm	39.0 mm	9.8 mm right	29.2 mm posterior	23.9 mm superior	39.0 mm		
Schnittlinie_links_aussen	5.9 mm	30.9 mm	19.1 mm	36.8 mm	5.0 mm left	27.6 mm posterior	23.9 mm superior	36.8 mm		
Condylus_Strecke_innen	90.0 mm	2.3 mm	4.9 mm	90.2 mm	90.1 mm right	2.0 mm anterior	1.7 mm inferior	90.2 mm		
Condylus_Strecke_aussen	126.5 mm	3.1 mm	4.4 mm	126.6 mm	126.5 mm right	0.5 mm anterior	3.3 mm inferior	126.6 mm		
Condylus_rechts_bis_Mitte	63.3 mm	3.2 mm	2.5 mm	63.4 mm	63.4 mm left	0.0 mm	0.0 mm	63.4 mm		
Condylus_rechts	18.4 mm	0.4 mm	2.5 mm	18.5 mm	18.4 mm left	1.9 mm posterior	0.1 mm inferior	18.5 mm		
Condylus_links_bis_Mitte	63.0 mm	3.2 mm	2.5 mm	63.1 mm	63.1 mm right	0.0 mm	0.0 mm	63.1 mm		
Condylus_links	18.1 mm	0.4 mm	3.0 mm	18.4 mm	18.0 mm right	3.4 mm posterior	1.7 mm inferior	18.4 mm		
Angles										
Schnittwinkel_rechts	2.0 °	0.1 °	1.3 °	1.2 °	1.7 °	0.1 °	1.5 °	1.2 °		
Schnittwinkel_links	0.6 °	0.0 °	0.4 °	0.4 °	0.5 °	0.0 °	0.5 °	0.4 °		
Condyluswinkel	162.6 °	18.4 °	180.0 °	162.6 °	174.7 °	21.9 °	163.4 °	162.6 °		
Planes										

Abbildung 2.25: Automatische Berechnung und tabellarische Darstellung der Distanzen und Winkel in VoXim: Aus der Position im Koordinatensystem der Bezugspunkte (rot) werden die Längen der Strecken (gelb) und Größe der Winkel (blau) errechnet.

3. Ergebnisse:

3.1 Simulation im 3D Orthognathic Surgery Simulator - Fotoserien

Im 3D-OSS-Versuch wurde eine Fotodokumentation von insgesamt 6 Fällen (3 mit Translation nach anterior, 3 mit Translation nach posterior) durchgeführt.

Die Ergebnisse des 3D-OSS sowie des CT-Modellversuchs unterscheiden sich abhängig von der Verlagerungsrichtung nach anterior oder posterior deutlich. Dabei zeichnen sich zwei Grundformen des bony interface ab, die in Abhängigkeit der Beträge der sagittalen Verlagerungsstrecke hinsichtlich ihrer Ausprägung variieren.

Die Ergebnisse der Versuche sind im Folgenden zunächst als Übersicht tabellarisch dargestellt. Anschließend folgt jeweils die detaillierte Beschreibung anhand je eines Fallbeispiels für die Vor- und Rückverlagerung.

3.1.1 Bei Vorverlagerung

3.1.1.1 Übersicht

Fall	Beobachtungen
Fall 1 ME13-GIJ-GIX, Fall 2 ME13-OXO-NEZ & Fall 3 ME14-RUJ-ZOT	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bei Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks Kollision der Segmente mit Lückenbildung und „condylar torque“ 2. Mit zunehmender Vorverlagerung mehr „condylar torque“ und breiter werdende Knochenlückenbreiten 3. Knochenlückenbreiten rechts > links 4. Knochenlücken haben „Keil“ Form 5. „Lateralshift“ der Kondylen bei Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente

Tabelle 3.1: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Vorverlagerung der Unterkieferspange im 3D-OSS Versuch. Das Verhalten war bei allen 3 Fällen identisch.

3.1.1.2 Fallbeispiel 1 ME13-GIJ-GIX

Bei inkrementeller Vorverlagerung der Unterkieferspange stoßen die Hinterränder des medialen Segments an die Innenflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente. Dadurch drehen sich die Kondylen um die Vertikalachse (y-Achse) nach außen (sogenannter „condylar torque“).

Mit progredienter Vorverlagerung resultiert eine rautenähnliche Konfiguration des bony interface mit steigendem Öffnungswinkel nach vorne. Die entstehende dreidimensionale geometrische Form lässt sich am ehesten als „Keil“ beschreiben (Abbildung 3.1).

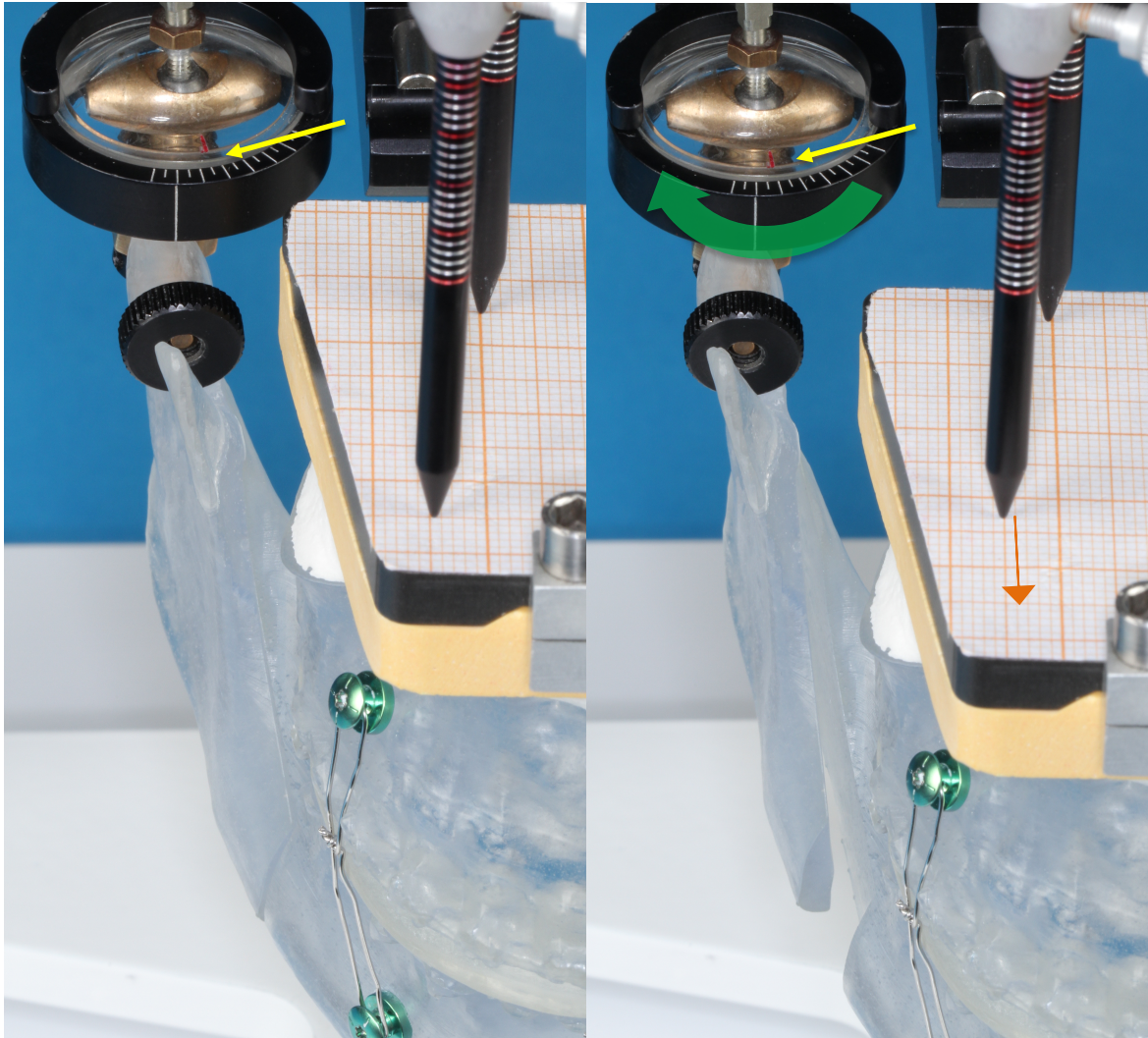


Abbildung 3.1: Darstellung des „condylar torques“ und der Lückenbildung im bony interface auf der rechten Seite bei Vorverlagerung im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Links 0 mm Vorverlagerung, rechts 12 mm Vorverlagerung. Die Vorverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Durch Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks (jeweils rechts im Bild) kommt es zur Kollision der Segmente am posterioren Rand der Anlagerungsfläche und zur Bildung einer Lücke zwischen den Segmenten im anterioren Bereich des Osteotomiespaltes. Der „condylar torque“ lässt sich an der Maßeinteilung der Kondylengehäusen ablesen (gelbe Pfeile). Der grüne Pfeil veranschaulicht die Auswärtsdrehung der Kondylen um die Vertikalachse. (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).

Ein forciertes Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente führt durch eine Kippung über einen punkt- oder linienförmigen Kollisionsbereich am dorsokranialen Rand der Anlagerungsfläche der Segmente zu einem „Lateralshift“ der Kondylen (Abbildung 3.2). Als „Lateralshift“ wird die Translation der Kondylen entlang der Transversalachse nach lateral bezeichnet.

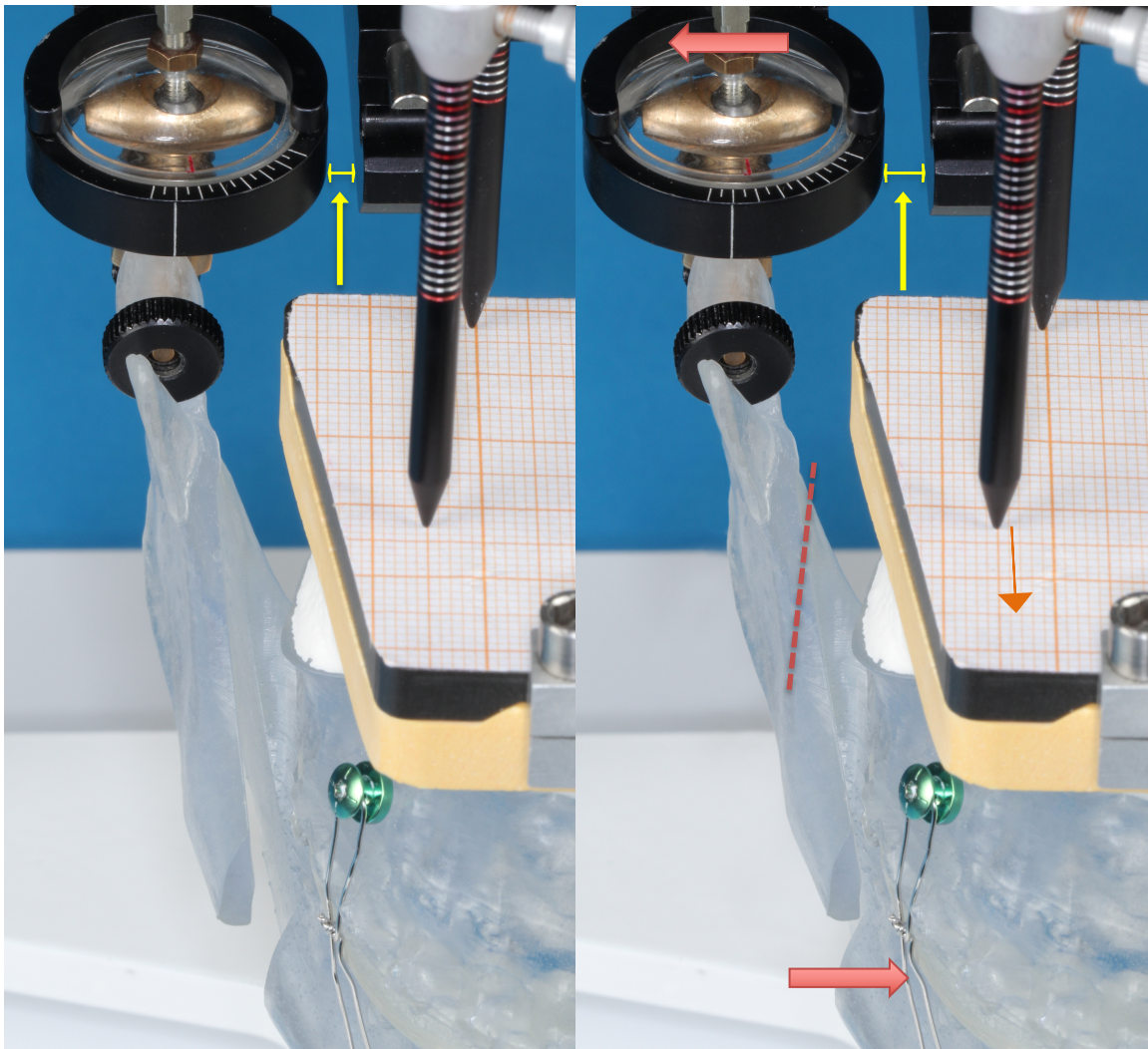


Abbildung 3.2: Darstellung des „Lateralshifts“ nach Vorverlagerung um 12 mm im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Die Vorverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Ein Lückenschluss nach der Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks durch forciertes Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (veranschaulicht durch den unteren roten Pfeil) führt durch eine Kippung über einen punkt- oder linienförmigen Kollisionsbereich am dorsokranialen Rand der Anlagerungsfläche der Segmente (gestrichelte rote Linie) zu einem „Lateralshift“ der Kondylen (veranschaulicht durch den oberen roten Pfeil und, dem Betrag entsprechend, durch die gelben Pfeile). (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).

3.1.2 Bei Rückverlagerung

3.1.2.1 Übersicht

Fall	Beobachtungen
Fall 4 ME14-XEK-TIQ, Fall 5 ME15-EJU-DUP & Fall 6 ME14-UTA-XOB	<ol style="list-style-type: none">1. Bei Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks Lückenbildungen zwischen den Segmenten ohne Kollision2. Kein „condylar torque“3. Mit zunehmender Rückverlagerung, breiter werdende Knochenlückenbreiten4. Knochenlückenbreiten rechts und links ähnlich5. Knochenlücken in „Quader“ Form6. „Medialshift“ der Kondylen bei Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente

Tabelle 3.2: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Rückverlagerung der Unterkieferspange im 3D-OSS Versuch. Das Verhalten war bei allen 3 Fällen identisch.

3.1.2.2 Fallbeispiel 6 ME15-EJU-DUP

Bei Rückverlagerung der UK-Spange ergibt sich ein anderes Bild. Rückverlagerungen resultieren in einer quaderähnlichen Strukturgebung des bony interface mit parallelen Seitenwänden, ohne dass Knocheninterferenzen zwischen den Segmenten auftreten.

Da die Seitenwände hierbei weitestgehend parallel stehen, entspricht diese geometrische Form eher einem flachen „Quader“ (Abbildung 3.3).

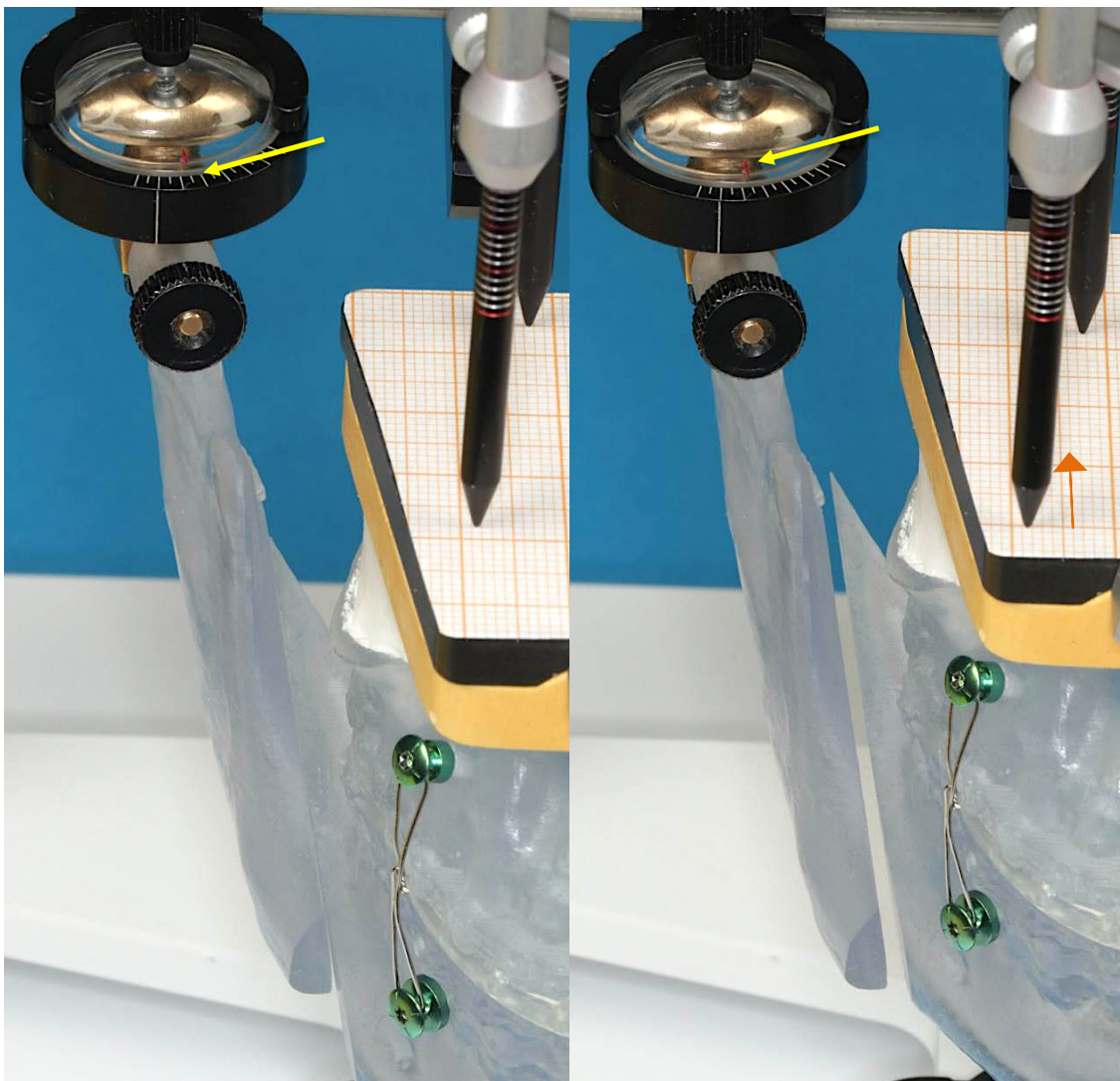


Abbildung 3.3: Darstellung der Lückenbildung auf der rechten Seite bei Rückverlagerung im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Links 0 mm Rückverlagerung, rechts 12 mm Rückverlagerung. Die Rückverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Durch Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks (jeweils rechts im Bild) kommt es zur Bildung einer Lücke zwischen den Segmenten am anterioren und posterioren Rand der Anlagerungsfläche der Segmente ohne Kollisionen der Segmente. Die Kondylenposition bleibt unverändert (gelbe Pfeile). (Fall 5 ME15-EJU-DUP).

Beim Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente kommt es im Gegensatz zur Vorverlagerung zu einem „Medialshift“ der Kondylen (Abbildung 3.4). Als „Medialshift“ wird die Translation der Kondylen entlang der Transversalachse nach medial bezeichnet.

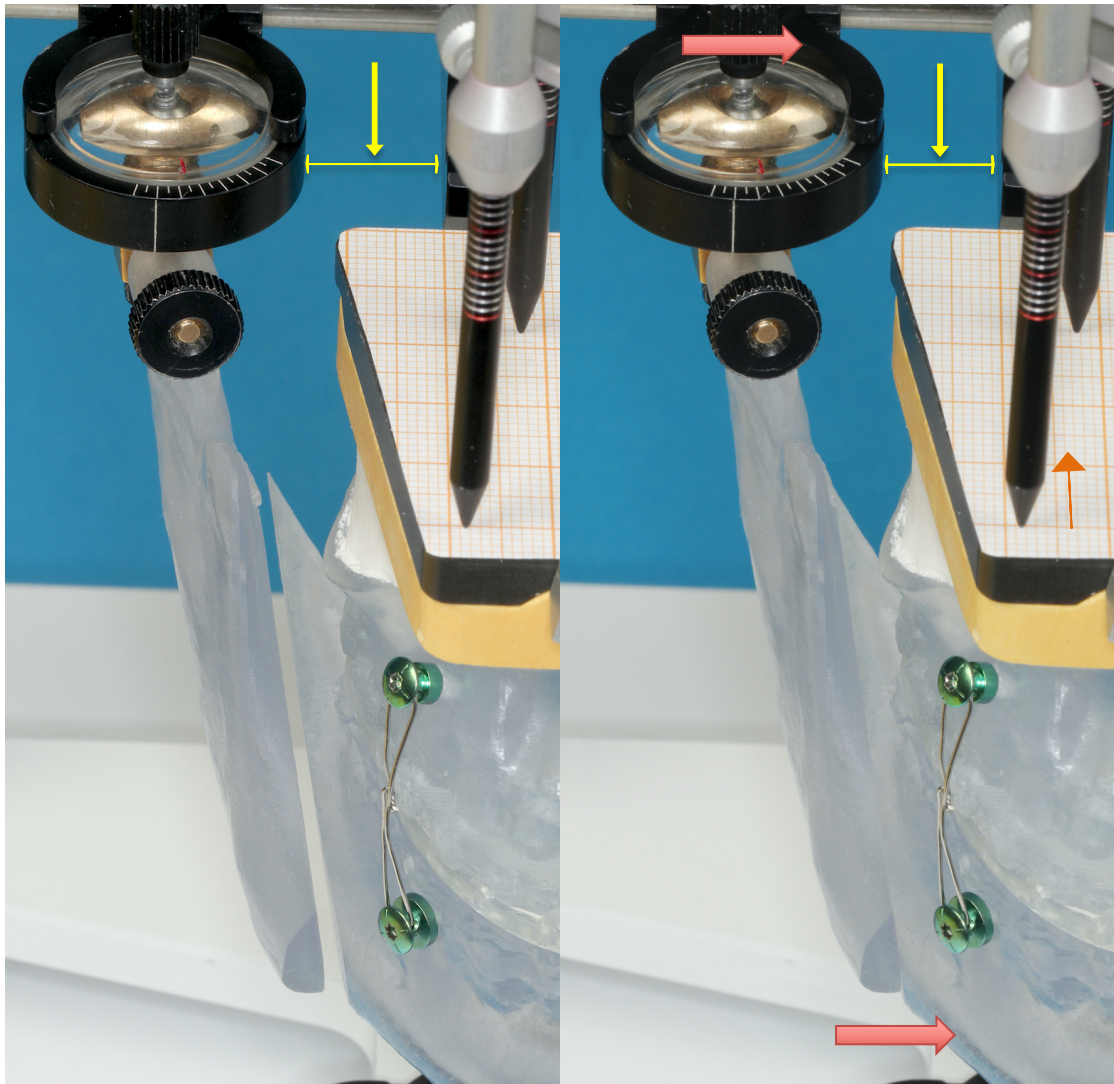


Abbildung 3.4: Darstellung des „Medialshifts“ nach Rückverlagerung um 12 mm im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Die Rückverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Ein Schluss der durch Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks entstandenen Lücke durch Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (veranschaulicht durch den unteren roten Pfeil) führt zu einem „Medialshift“ der Kondylen (veranschaulicht durch den roten Pfeil oben am Kondylengehäuse und, dem Betrag entsprechend, durch die gelben Pfeile). (Fall 5 ME15-EJU-DUP).

3.2 Computertomographische Untersuchungsreihe

3.2.1 3D-Form Analyse des bony interface in Geomagic Qualify 2012

In der Software Geomagic Qualify 2012 bestätigen sich die Beobachtungen, aus der 3D-OSS Fotoserie durch Darstellung des bony interface in dreidimensionaler, digitaler Form.

3.2.1.1 Bei Vorverlagerung

3.2.1.1.1 Übersicht

Fall	Beobachtungen
Fall 1 ME13-GIJ-GIX, Fall 2 ME13-OXO-NEZ & Fall 3 ME14-RUJ-ZOT	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bei Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks gleiches Verhalten des bony interface wie im 3D-OSS Versuch 2. Kollision der Segmente mit Lückenbildung und „condylar torque“ 3. Mit zunehmender Vorverlagerung zunehmend „condylar torque“ und kontinuierlich breiter werdende Knochenlückenbreiten 4. Abnahme der Anlagerungsfläche der Segmente mit zunehmender Verlagerung 5. Bestätigung der „Keil“ Form durch „heat map“, Breitenzunahme von posterior nach anterior 6. Bestätigung des „Lateralshift“ der Kondylen bei Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente
Fall 1 ME13-GIJ-GIX	7(i). Knochenlückenbreite anterior bei 12 mm Vorverlagerung rechts 4,5 mm, links 3,4 mm
Fall 2 ME13-OXO-NEZ	7(ii). Knochenlückenbreite anterior bei 12 mm Vorverlagerung rechts 6,2 mm, links 5,7 mm

Fall 3 ME14-RUJ-ZOT	7(iii). Knochenlückenbreite anterior bei 12 mm Vorverlagerung rechts 4,1 mm, links 1,7 mm
---------------------	--

Tabelle 3.3: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Vorverlagerung der Unterkieferspange im CT-Versuch.

3.2.1.1.2 Fallbeispiele 1 ME13-GIJ-GIX und 2 ME13-OXO-NEZ

Es zeigt sich in allen Fällen, dass bei sequenzieller Vorverlagerung die Knochenlücken am anterioren Rand der Anlagerungsflächen kontinuierlich breiter werden (exemplarische Übersicht Abbildung 3.5, Detailansicht Abbildung 3.6)

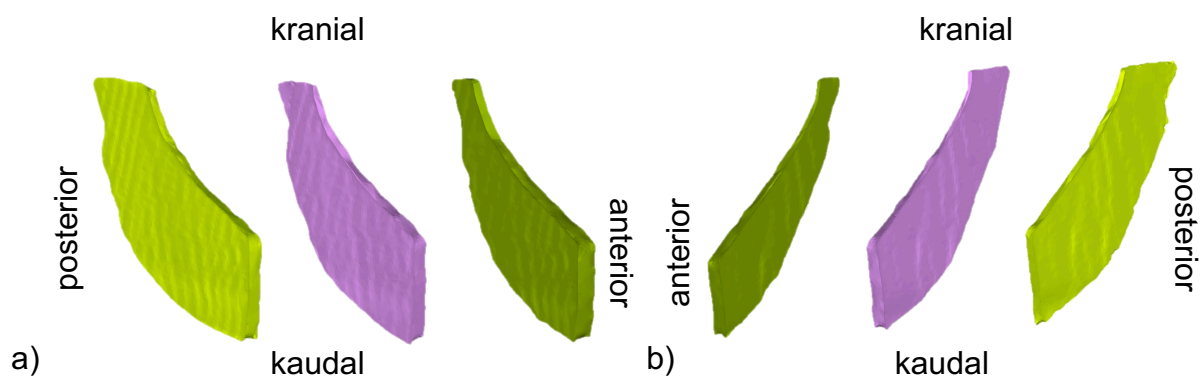


Abbildung 3.5: Exemplarische Übersicht der Umriss- & Größen der Knochenlücken bei zunehmenden Vorverlagerungsbeträgen des mandibulo-maxillären Blocks (hellgrün 4 mm, violett 8 mm, dunkelgrün 12 mm Vorverlagerung) in 3D Form. Die dargestellten 3D Körper stellen eine Art „Ausguss“ der Knochenlücken dar, wie in Abbildung 2.13 und 2.14 erläutert. a) rechts; b) links; (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).

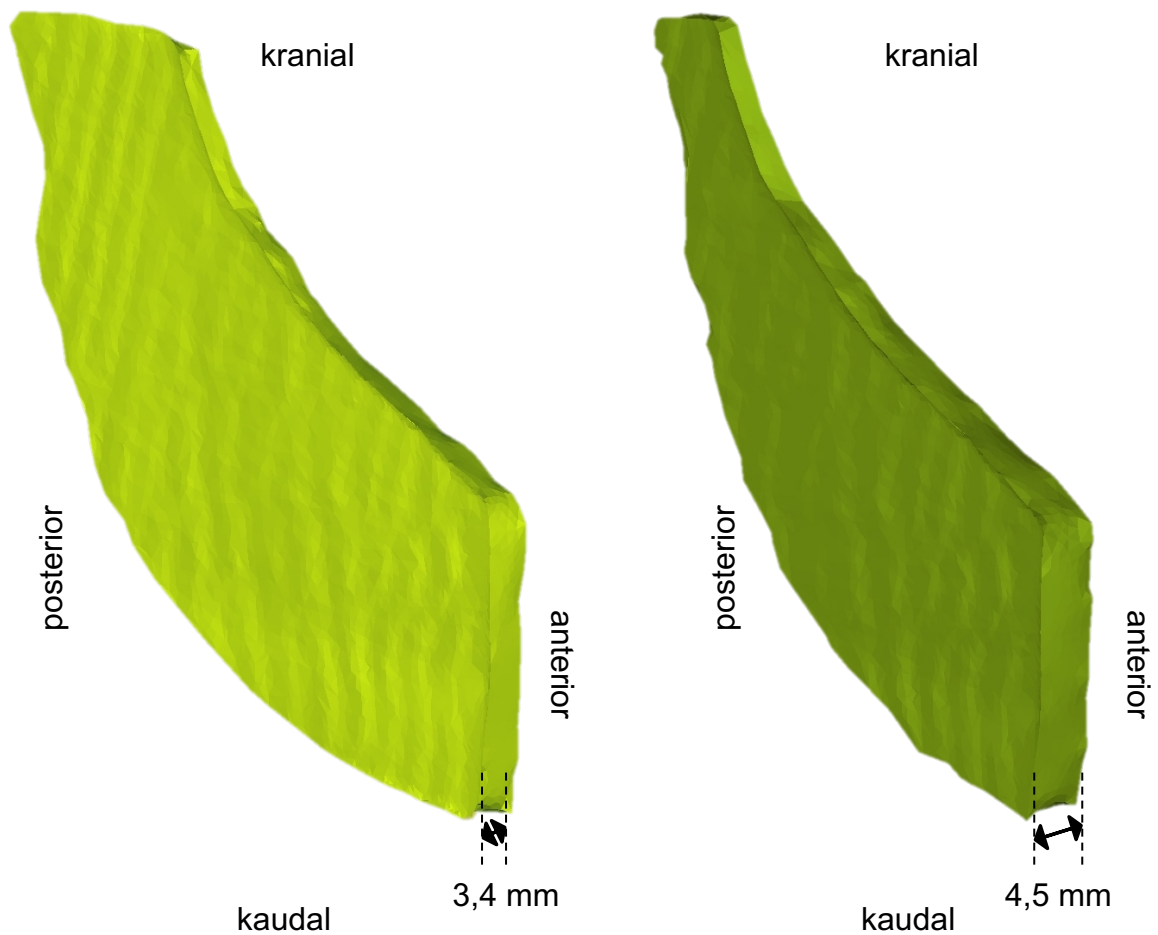


Abbildung 3.6: Detailansicht (aus Abbildung 3.5) und Gegenüberstellung der Knochenlücken der rechten Seite bei Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 4 mm (links hellgrün) und um 12 mm (rechts dunkelgrün). Die Knochenlückenbreite nimmt bei größerer Vorverlagerung zu. Innerhalb der Knochenlücke nimmt die Breite von kranial posterior nach kaudal anterior zu und hat am anterioren Rand der Anlagerungsflächen die größte Breite. (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).

Die unterschiedliche Ausdehnung der Keile in anteroposteriorer Richtung zeigt, dass die Anlagerungsfläche der Segmente mit zunehmender Verlagerung abnimmt (Abbildung 3.7).

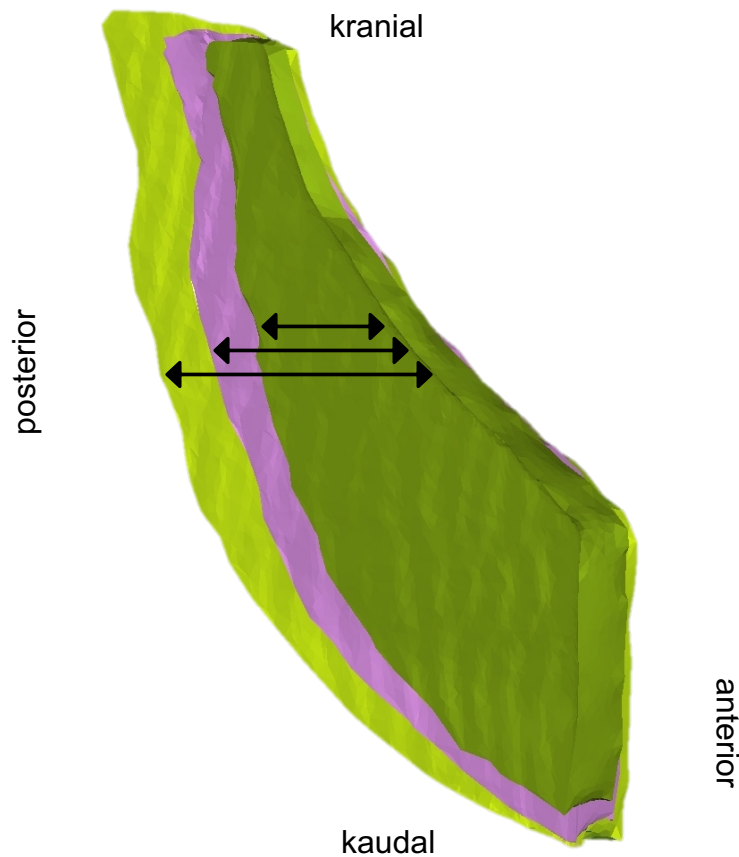


Abbildung 3.7: Überlagerung der 3D Formen aus Abbildung 3.5 (Knochenlücken der rechten Seite bei Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks (hellgrün 4 mm, violett 8 mm, dunkelgrün 12 mm)). Es zeigt sich, dass mit zunehmender Verlagerung die Anlagerungsfläche in anteroposteriorer Richtung abnimmt (schwarze Pfeile). (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).

In der farblich markierten Schichtbreitenanalyse der Keile bestätigen sich anschaulich die Tendenzen, die sich schon in Abbildung 3.5 andeuten. Es ist erkennbar, dass der Keil im posterioren Bereich am schmalsten ist und vorne unten die breiteste Stelle aufweist (Abbildung 3.8).

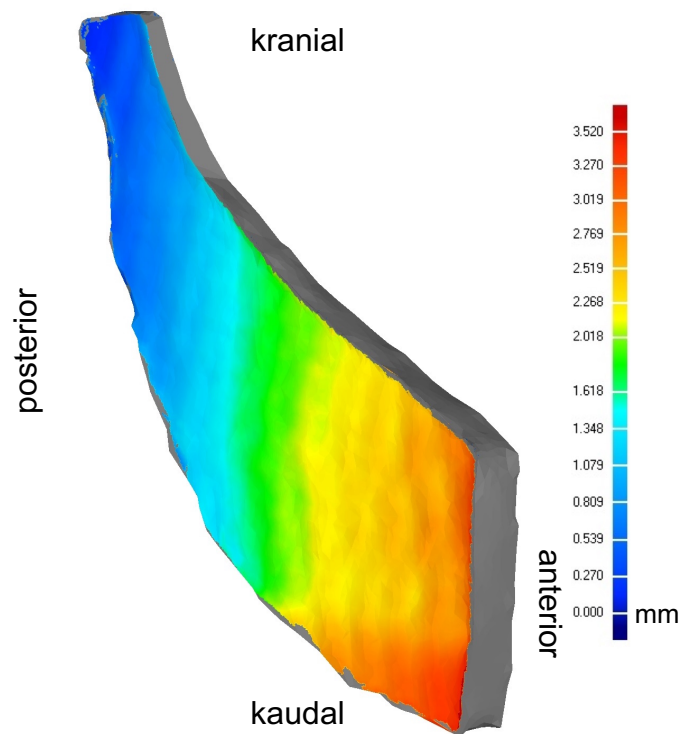


Abbildung 3.8: Schichtbreitenanalyse der Knochenlückenbreite rechts (in mm) bei 12 mm Vorverlagerung. Die Breite (in mediolateraler Richtung) der Knochenlücke wird in unterschiedlichen Farben (sog. „heat map“) dargestellt (siehe Skala rechts). Zunehmende Breiten von blau, über grün und gelb zu rot. Es ist erkennbar, dass die Breite von kranial posterior nach kaudal anterior zunimmt und am anterioren Rand der Anlagerungsflächen die größte Breite aufweist. (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).

Als Konsequenz der geänderten Geometrie im bony interface kann es zu folgenden Kondylenveränderungen kommen (Abbildung 3.9):

Bei Andrücken der lateralen gelenktragenden Ramussegmente kippen diese aus der blau markierten primären Stellung in die rote Position. Dies ist der Knocheninterferenz im dorsokranialen Bereich des Osteotomiespalts geschuldet, über welche die lateralen gelenktragenden Ramussegmente „kippen“. Außerdem kommt es bei Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente zu einer Rotation dieser um die Sagittalachse („roll“) nach außen. Dies ist dadurch bedingt, dass die Knocheninterferenz im dorsokranialen Bereich liegt und somit eine

„Kippung“ der lateralen gelenktragenden Ramussegmente nicht nur um die Vertikalachse sondern auch um die Sagittalachse bewirkt.

Es kam in allen Fällen zu diesen Positionsveränderungen der Kondylen.

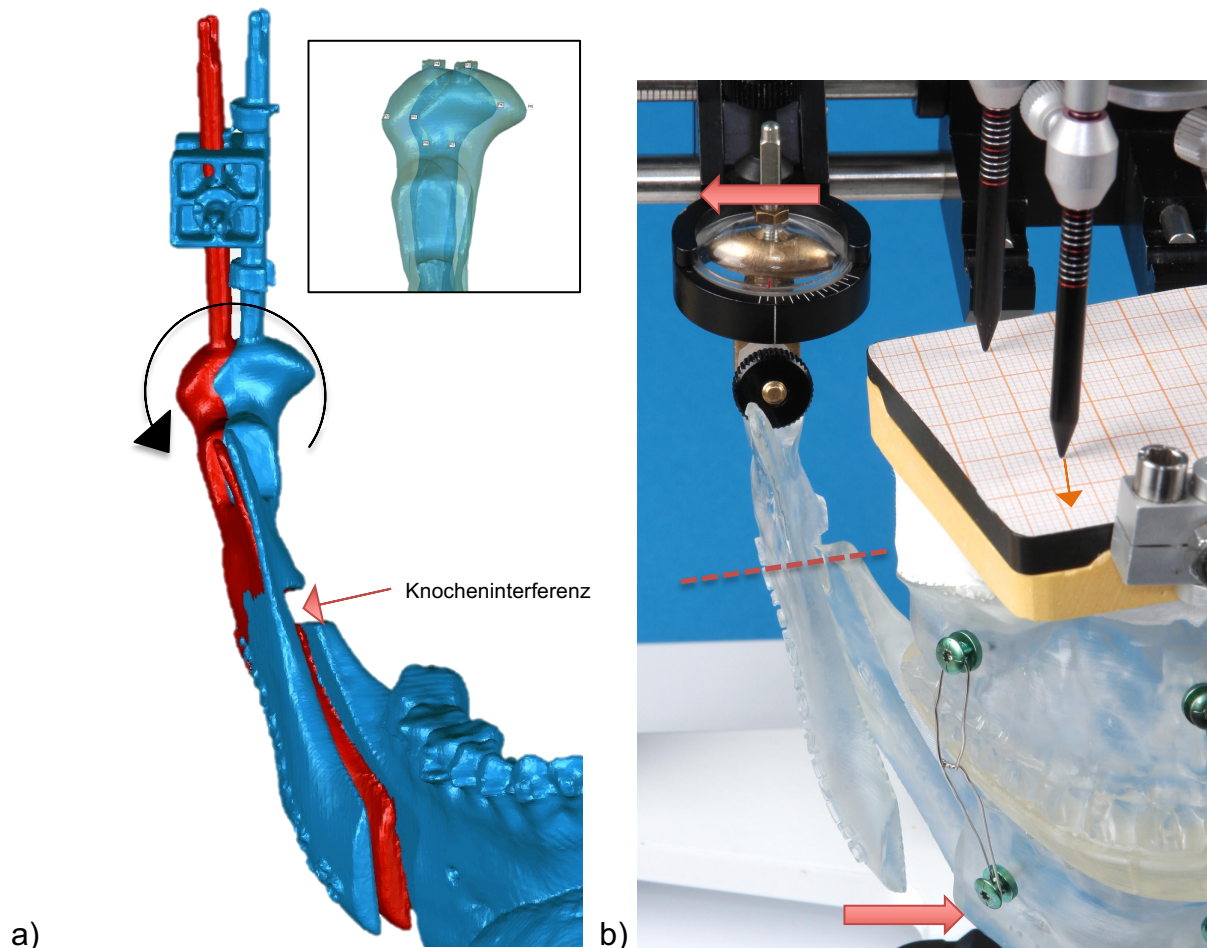


Abbildung 3.9: Darstellung der Veränderung der Kondylenposition bei 12 mm Vorverlagerung (orangener Pfeil) als Gegenüberstellung der Ansichten aus a) Geomagic Qualify und b) dem 3D-OSS Versuch. a) blau: primäre Position vor Freigabe und Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente; rot: Position nach Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente. Es ist ein „Lateralshift“ der Kondylen zu erkennen. Außerdem ist eine Rotation um die Sagittalachse („roll“) des lateralen gelenktragenden Ramussegments nach außen erkennbar (schwarzer gekrümmter Pfeil). Der schmale rote Pfeil markiert die Knocheninterferenz. Kasten: Nahansicht des „Lateralshifts“ (bzw. der Kondylenüberlagerung). (Beachte: Der Oberkiefer wurde zur besseren Übersicht in dieser Ansicht entfernt). b) Zur Gegenüberstellung die entsprechende Abbildung aus dem 3D-OSS Versuch, die roten Pfeile weisen auf den „Lateralshift“ der Kondylen bei Adaptation des lateralen gelenktragenden Ramussegments hin. Die rot gestrichelte Linie markiert die Knocheninterferenz. (Fall 2 ME13-OXO-NEZ)

3.2.1.2 Bei Rückverlagerung

3.2.1.2.1 Übersicht

Fall	Beobachtungen
Fall 4 ME14-XEK-TIQ (mandibuläre Prognathie), Fall 5 ME15-EJU-DUP (mandibuläre Prognathie) & Fall 6 ME14-UTA-XOB (mandibuläre Prognathie)	1. Bei Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks gleiches Verhalten des bony interface wie im 3D-OSS Versuch 2. Lückenbildung zwischen den Segmenten ohne Kollision 3. Kein „condylar torque“ 4. Mit zunehmender Rückverlagerung, breiter werdende Knochenlückenbreiten 5. Abnahme der Anlagerungsfläche der Segmente mit zunehmender Verlagerung 6. Bestätigung der „Quader“ Form durch „heat map“, Parallelität der Seitenwände der Quader 7. Bestätigung des „Medialshifts“ der Kondylen bei Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente
Fall 4 ME14-XEK-TIQ	7(i). Knochenlückenbreite anterior bei 12 mm Vorverlagerung rechts 2,3 mm, links 2,0 mm
Fall 5 ME15-EJU-DUP	7(ii). Knochenlückenbreite anterior bei 12 mm Vorverlagerung rechts 3,2 mm, links 3,2 mm
Fall 6 ME14-UTA-XOB	7(iii). Knochenlückenbreite anterior bei 12 mm Vorverlagerung rechts 2,8 mm, links 1,8 mm

Tabelle 3.4: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Rückverlagerung der Unterkieferspange im CT-Versuch.

3.2.1.2.2 Fallbeispiele 6 ME15-EJU-DUP und 7 ME14-UTA-XOB

Auch bei sequenzieller Rückverlagerung werden die Knochenlücken mit zunehmenden Verlagerungsbeträgen breiter (exemplarische Übersicht Abbildung 3.10, Detailansicht Abbildung 3.11). Die unterschiedliche Ausdehnung der 3D Formen in anteroposteriorer Richtung zeigt, dass die Anlagerungsfläche der Segmente mit zunehmender Verlagerung abnimmt (Abbildung 3.11).

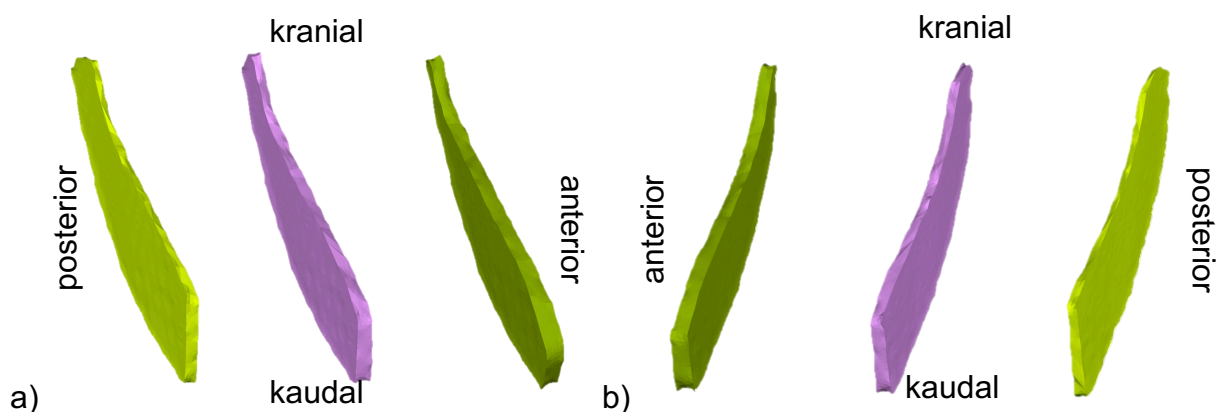


Abbildung 3.10 Exemplarische Übersicht der Umriss- & Größen der Knochenlücken bei zunehmenden Rückverlagerungsbeträgen des mandibulo-maxillären Blocks (hellgrün 4 mm, violett 8 mm, dunkelgrün 12 mm Rückverlagerung) in 3D Form. Die dargestellten 3D Körper stellen eine Art „Ausguss“ der Knochenlücken dar, wie in Abbildung 2.13 und 2.14 erläutert. a) rechts; b) links; (Fall 5 ME15-EJU-DUP).

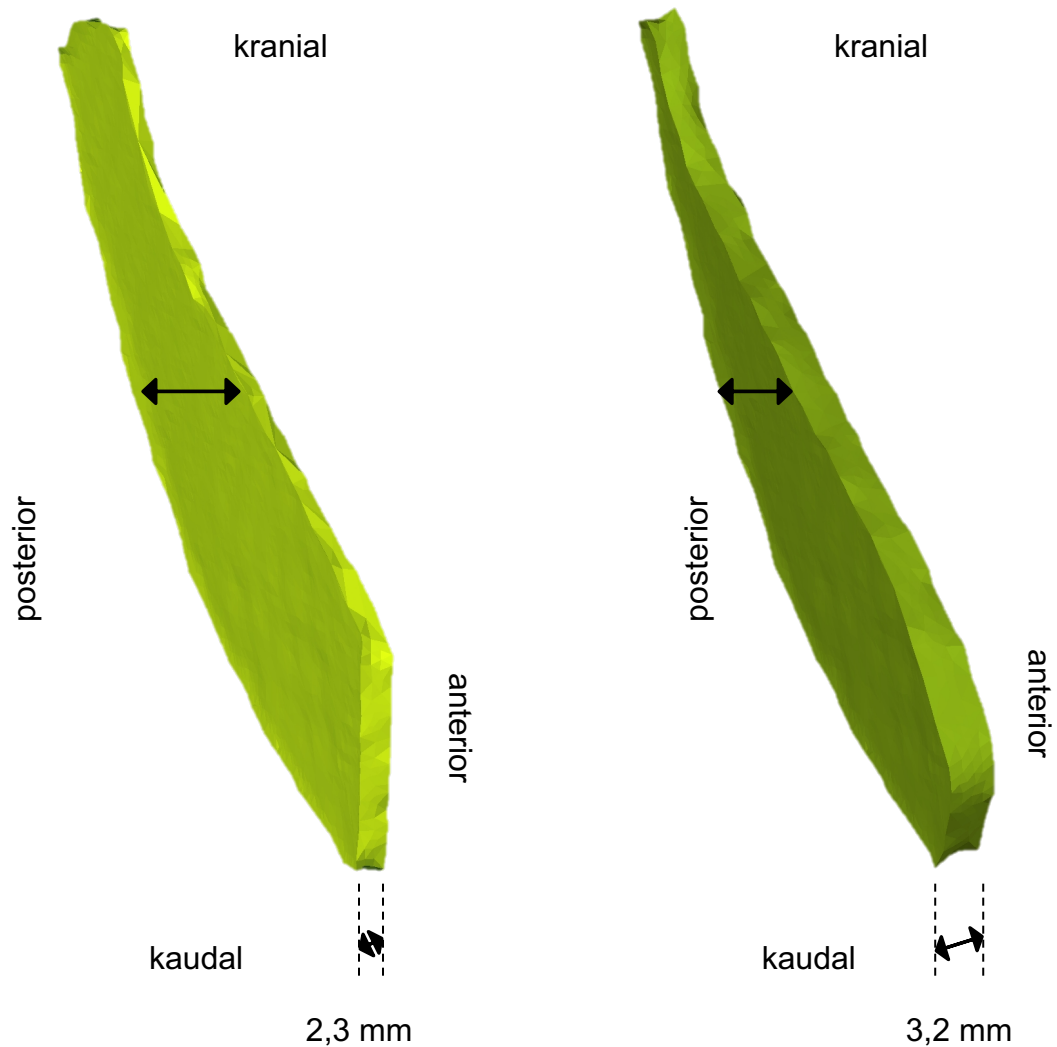


Abbildung 3.11: Detailansicht (aus Abbildung 3.10) und Gegenüberstellung der Knochenlücken der rechten Seite bei Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 4 mm (links hellgrün) und um 12 mm (rechts dunkelgrün). Die Knochenlückenbreite nimmt bei größerer Rückverlagerung zu. Innerhalb der Knochenlücke ist die Breite am posterioren und anterioren Rand der Segmentanlagerungsflächen vergleichbar. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Verlagerung die Anlagerungsfläche in anteroposteriorer Richtung abnimmt (schwarze Pfeile). (Fall 5 ME15-EJU-DUP).

Die farblich markierte Schichtbreitenanalyse zeigt, dass bei Rückverlagerungen die Parallelität der Wände der jeweiligen „Quader“ aufrecht erhalten bleibt und die transversale Breite der „Quader“ zunimmt (Abbildung 3.12). Dass die Schichtbreitenanalyse keine Stelle aufweist, an dem die Breite 0 mm beträgt, belegt, dass keine Kollision der Segmente stattfindet.

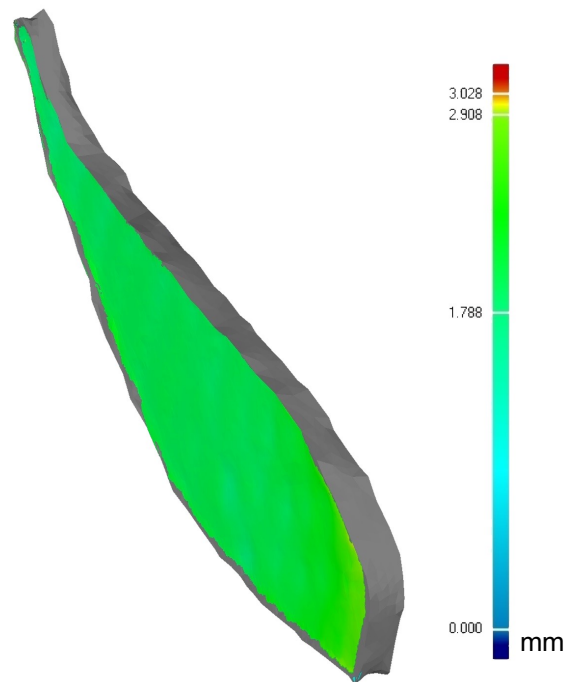


Abbildung 3.12: Schichtbreitenanalyse (sog. „heat map“) der Knochenlückenbreite rechts (in mm) bei 12 mm Rückverlagerung. Die Breite (in mediolateraler Richtung) der Knochenlücke wird in unterschiedlichen Farben dargestellt (siehe Skala rechts). Zunehmende Breiten von blau, über grün und gelb zu rot. Es ist erkennbar, dass innerhalb der Knochenlücke die Breite vom posterioren zum anterioren Rand der Segmentanlagerungsflächen konstant ist. (Fall 5 ME15-EJU-DUP).

Bei Rückverlagerung führten die Knochenlücken beim Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente in allen Fällen zu einem zunehmenden „Medialshift“ der Kondylen (Abbildung 3.13).

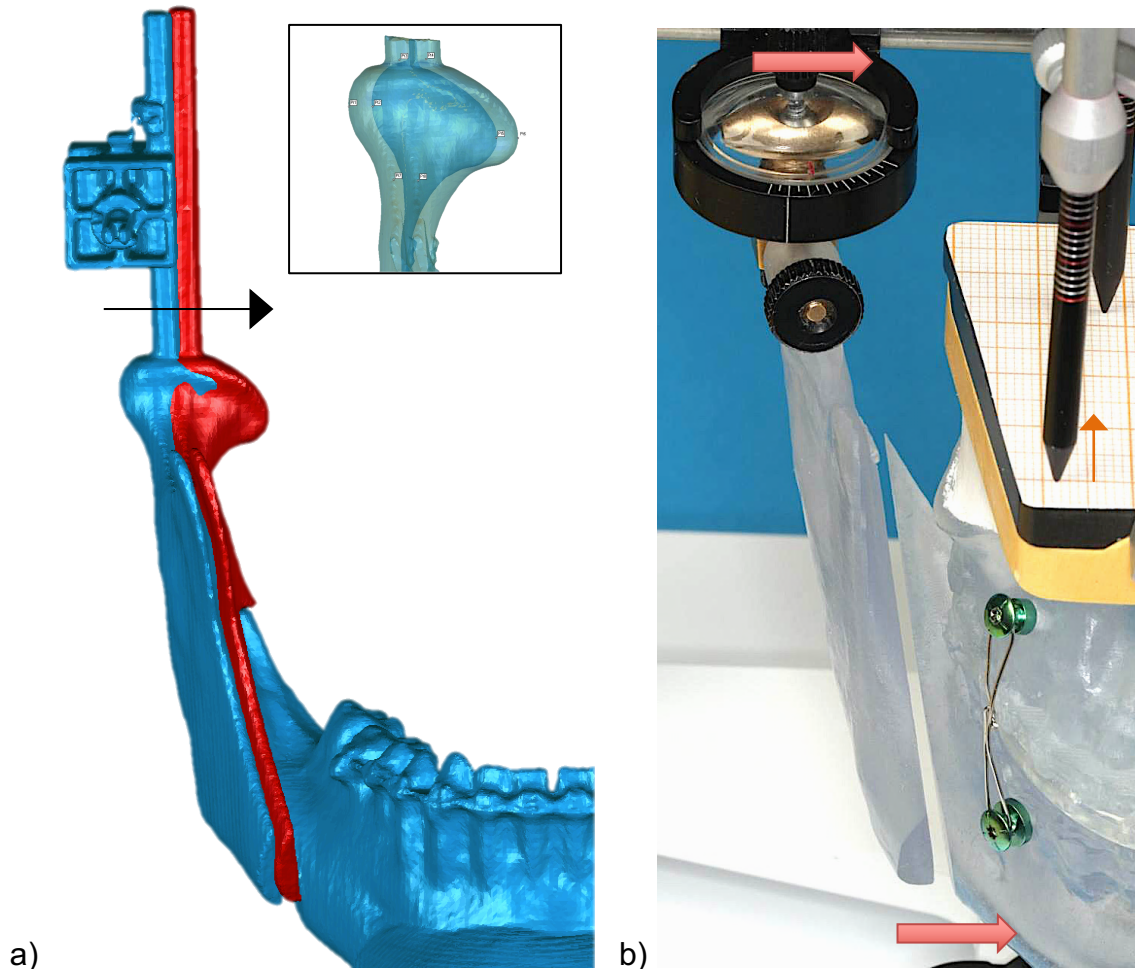


Abbildung 3.13: Darstellung der Veränderung der Kondylenposition bei 12 mm Rückverlagerung (orangener Pfeil) als Gegenüberstellung der Ansichten aus a) Geomagic Qualify und b) dem 3D-OSS Versuch. a) blau: primäre Position vor Freigabe und Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente; rot: Position nach Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente. Es ist ein „Medialshift“ des lateralen gelenktragenden Ramussegments und somit der Kondylen zu erkennen (schwarzer Pfeil). Kasten: Nahansicht des „Medialshifts“ (bzw. der Kondylenüberlagerung). (Beachte: Der Oberkiefer wurde zur besseren Übersicht in dieser Ansicht entfernt). b) Zur Gegenüberstellung die entsprechende Abbildung aus dem 3D-OSS Versuch, die roten Pfeile weisen auf den „Medialshift“ der Kondylen bei Adaptation des lateralen gelenktragenden Ramussegments hin. (Fall 6 ME14-UTA-XOB)

3.2.2 Metrische Vermessung des bony interface in VoXim

Durch digitale Einsichtnahme in die CT-Schichtaufnahmen des bony interface ließen sich die entstehenden geometrischen Formen mit der Software VoXim vermessen. Die Messwerte, auf die sich die im Folgenden dargestellten Grafiken beziehen, sind im Anhang tabellarisch beigefügt (siehe Anhang Tabellen 1-4).

3.2.2.1 Knochenlückenöffnungswinkel

Bei Vorverlagerung:

Das Liniendiagramm 3.14 zeigt für die 3 Patientenfälle, bei denen eine inkrementelle Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks durchgeführt wurde, beidseits einen mit zunehmender Verlagerungsstrecke steigenden Öffnungswinkel der Segmentanlagerungsflächen zueinander - also der Knochenlücken - nach vorne. Bei 5 aus 6 Knochenlücken ist diese Zunahme kontinuierlich, eine Lücke verläuft als Plateau (Fall 3 ME14-RUJ-ZOT links). Der größte Winkel bei maximaler Vorverlagerung (12 mm) zeigt sich bei Fall 3 ME14-RUJ-ZOT rechts mit einem Winkel von 7°.

Die Korrektur des mandibulo-maxillären Blocks im Bezug zur Bipupillarlinie (Ausgleich des „cantings“) vor den Translationen erklärt, warum es zum Teil bereits bei der Ausgangsposition „0 mm“ zu Öffnungswinkeln kommt. Dies trifft auf Fall 3 ME14-RUJ-ZOT rechts zu (gewertet ab Werten größer als 1 mm).

Ein gewisses Symmetrieverhalten der rechten und linken Seite ist für Fall 1 ME13-GIJ-GIX erkennbar. Jedoch unterscheiden sich die rechte und linke Seite darin, dass die Kurve der rechten Seite zunächst steil ansteigt und dann abflacht. Die linke Seite verhält sich stufenweise und beginnt mit einem flachen Absatz. Die Kurven für Fall 2 ME13-OXO-NEZ zeigen ebenfalls einen Parallelverlauf, jedoch steigt die linke Seite eher in zwei Stufen an, die rechte dagegen Seite eher stetig. In Fall 3 ME14-RUJ-ZOT ist kein Symmetrieverhalten erkennbar, die rechte Seite nimmt ähnlich der Bogenform einer Logarithmusfunktion zu, die linke Seite erreicht schon nach 4 mm ihr Maximum und stagniert dann.

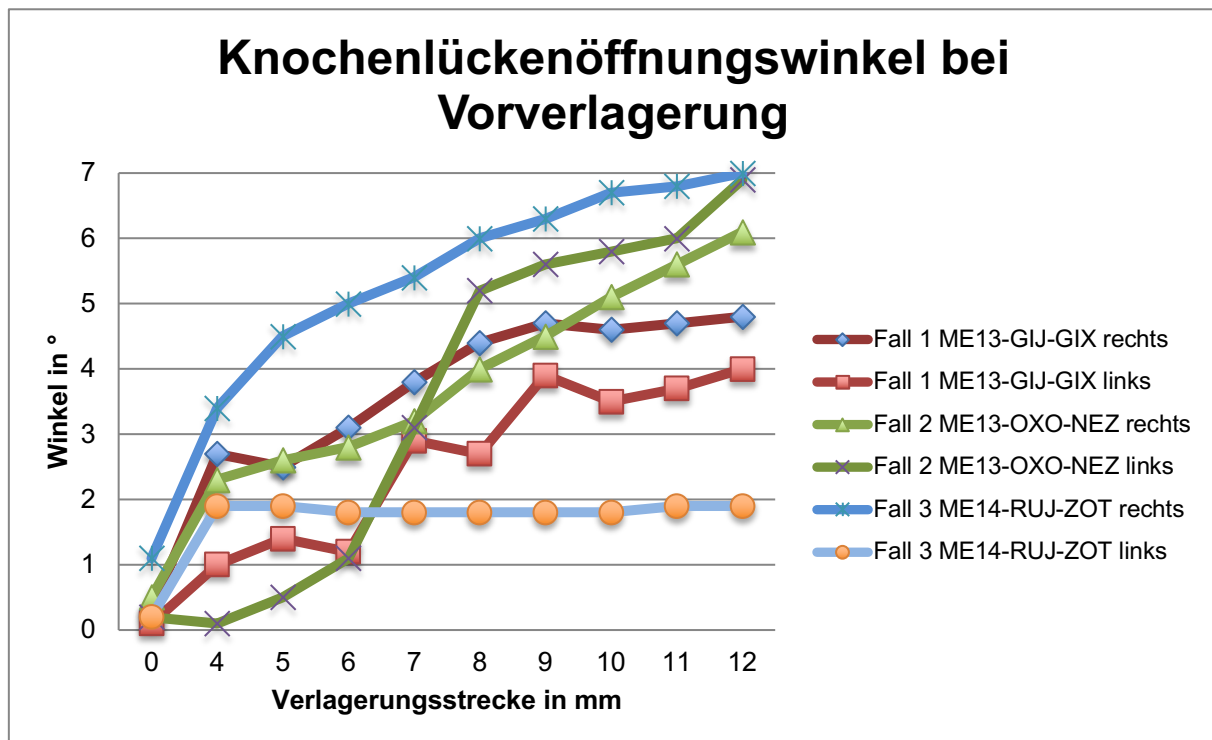


Abbildung 3.14: Liniendiagramm - Knochenlückenöffnungswinkel der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils rechts und links: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenöffnungswinkel in Grad auf der y-Achse, rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 1 rot, Fall 2 grün, Fall 3 blau (Siehe Anhang Tabelle 1a).

Bei Rückverlagerung:

Das Liniendiagramm 3.15 zeigt, dass bei den 3 Patientenfällen bei denen eine inkrementelle Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks durchgeführt wurde, keine eindeutige Korrelation zwischen der Verlagerungsstrecke der Segmente und dem Knochenlückenöffnungswinkel besteht. Der größte Knochenlückenöffnungswinkel findet sich bei Fall 6 ME-14-UTA-XOB rechts mit einem Winkel von 2,5° bei 10 mm Rückverlagerung. Damit sind die Winkel deutlich kleiner als bei Vorverlagerung. Der Ausgleich des „cantings“ vor den Translationen erklärt, warum bei 3 Lücken bereits bei der Ausgangsposition „0 mm“ Öffnungswinkel bestehen (gewertet ab Werten größer als 1°) (Fall 6 ME-14-UTA-XOB rechts, Fall 4 ME14-XEK-TIQ rechts, Fall 5 ME15-EJU-DUP links).

Ein Symmetrieverhalten der rechten und linken Seite ist nicht klar erkennbar, jedoch verhalten sich die Dimensionen der jeweils rechten und linken Seite der 3 Fälle ähnlich. Damit ist gemeint, dass sich in Fall 4 ME14-XEK-TIQ die meisten Werte sowohl für rechts als auch für links zwischen 0° und 1° liegen. In Fall 5 ME15-EJU-

DUP gilt dies für den Bereich $0,5^\circ$ und $1,5^\circ$. In Fall 6 ME14-UTA-XOB befinden sich die meisten Werte zwischen 1° und $2,5^\circ$. Auffällig ist insbesondere bei Fall 4 ME 14-XEK-TIQ rechts, Fall 5 ME 15-EJU-DUP und Fall 6 ME 14-UTA-XOB das Zick-Zack Muster der Kurvenverläufe innerhalb dieser Spannweiten, die nicht verlassen werden.

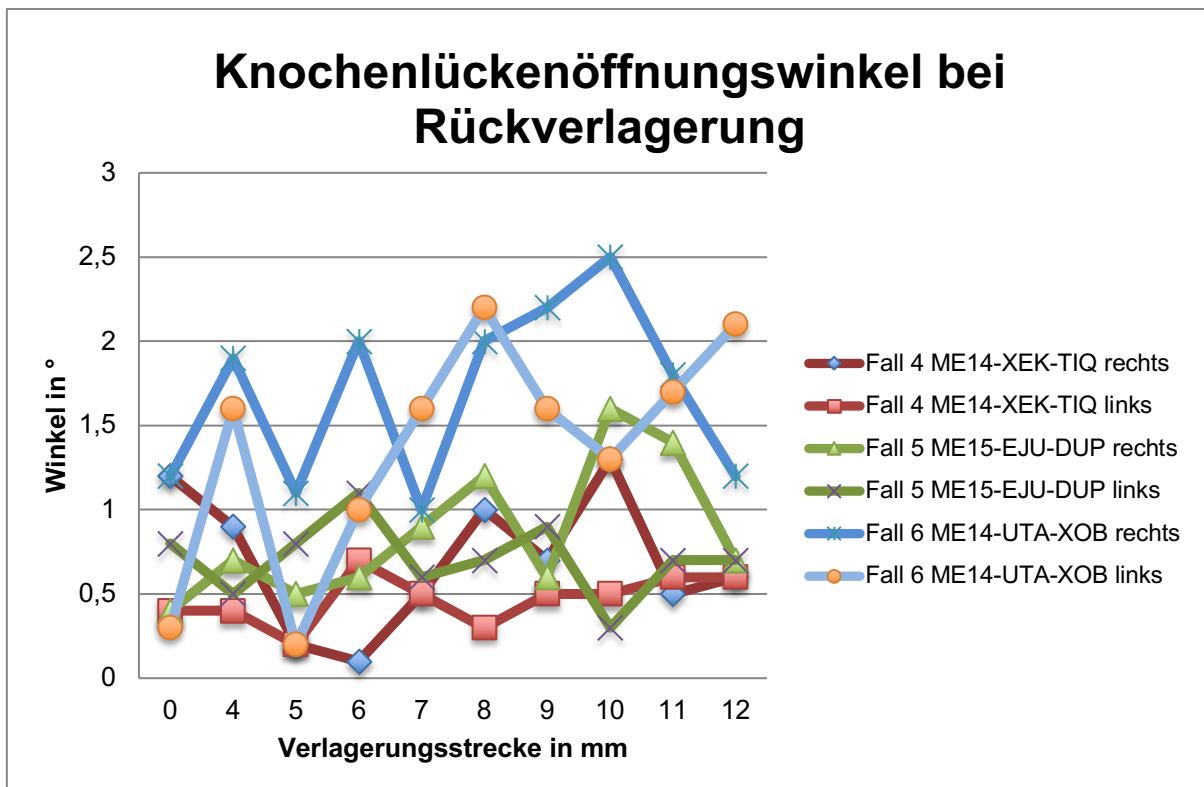


Abbildung 3.15: Liniendiagramm - Knochenlückenöffnungswinkel der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils rechts und links: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenöffnungswinkel in Grad auf der y-Achse (beachte die unterschiedliche Skalierung zu Abbildung 3.14), rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 4 rot, Fall 5 grün, Fall 6 blau (Siehe Anhang Tabelle 1b).

3.2.2.2 Knochenlückenbreiten

Bei Vorverlagerung:

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Knochenlückenbreiten für jeden Patientenfall einzeln und jeweils die Breiten am anterioren und am posterioren Rand der Anlagerungsfläche in einer parallelen Diagrammreihenfolge dargestellt und einander gegenüber gestellt (Liniendiagramme 3.16, anterior jeweils Kurven linke Spalte, posterior jeweils Kurven rechte Spalte). Bei inkrementeller Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks nimmt die anteriore Knochenlückenbreite mit größer werdender Translation bei allen 3 Patientenfällen zu (Liniendiagramme 3.16, Kurven linke Spalte). Bei 5 von 6 Knochenlücken ist die anteriore Zunahme kontinuierlich, bei einer wird schon ab 4 mm Vorverlagung ein Plateau erreicht (Fall 3 ME14-RUJ-ZOT links). Die größte anteriore Knochenlückenbreite findet sich bei Fall 2 ME13-OXO-NEZ bei maximaler Vorverlagerung (12 mm) mit einer Breite von 6,2 mm.

Der Verlauf und die Symmetrie der Kurven der anterioren Knochenlückenbreiten bei Vorverlagerung erinnert an den Kurvenverlauf der Knochenlückenöffnungswinkel, da diese beiden Parameter in enger Beziehung zueinander stehen.

In Fall 1 ME13-GIJ-GIX rechts anterior und links anterior kam es durch Ausgleich es „cantings“ vor den Translationen bereits bei der Ausgangsposition „0 mm“ zu Lücken (gewertet ab Werten größer als 1 mm).

Die Werte für die posteriore Knochenlückenbreite nehmen mit zunehmender Verlagerung nicht konstant zu, sondern bleiben in engen Grenzen zwischen 0 mm und ca. 1 mm konstant. (Liniendiagramme 3.16, Kurven rechte Spalte). Der Vergleich der anterioren und posterioren Knochenlückenbreiten bei gleicher Skalierung der y-Achse veranschaulicht die Diskrepanz zwischen zunehmenden Werten anterior und unverändert niedrigen Werten posterior. Ein Symmetrieverhalten der rechten und linken Seite ist vor allem für Fall 1 ME13-GIJ-GiX und Fall 2 ME13-OXO-NEZ erkennbar. Die größte posteriore Knochenlückenbreite beträgt 1,7 mm und findet sich bei Fall 1 ME13-GIJ-GIX links bei 4 mm Vorverlagerung und bei Fall 3 ME14-RUJ-ZOR links bei 10 mm Vorverlagerung.

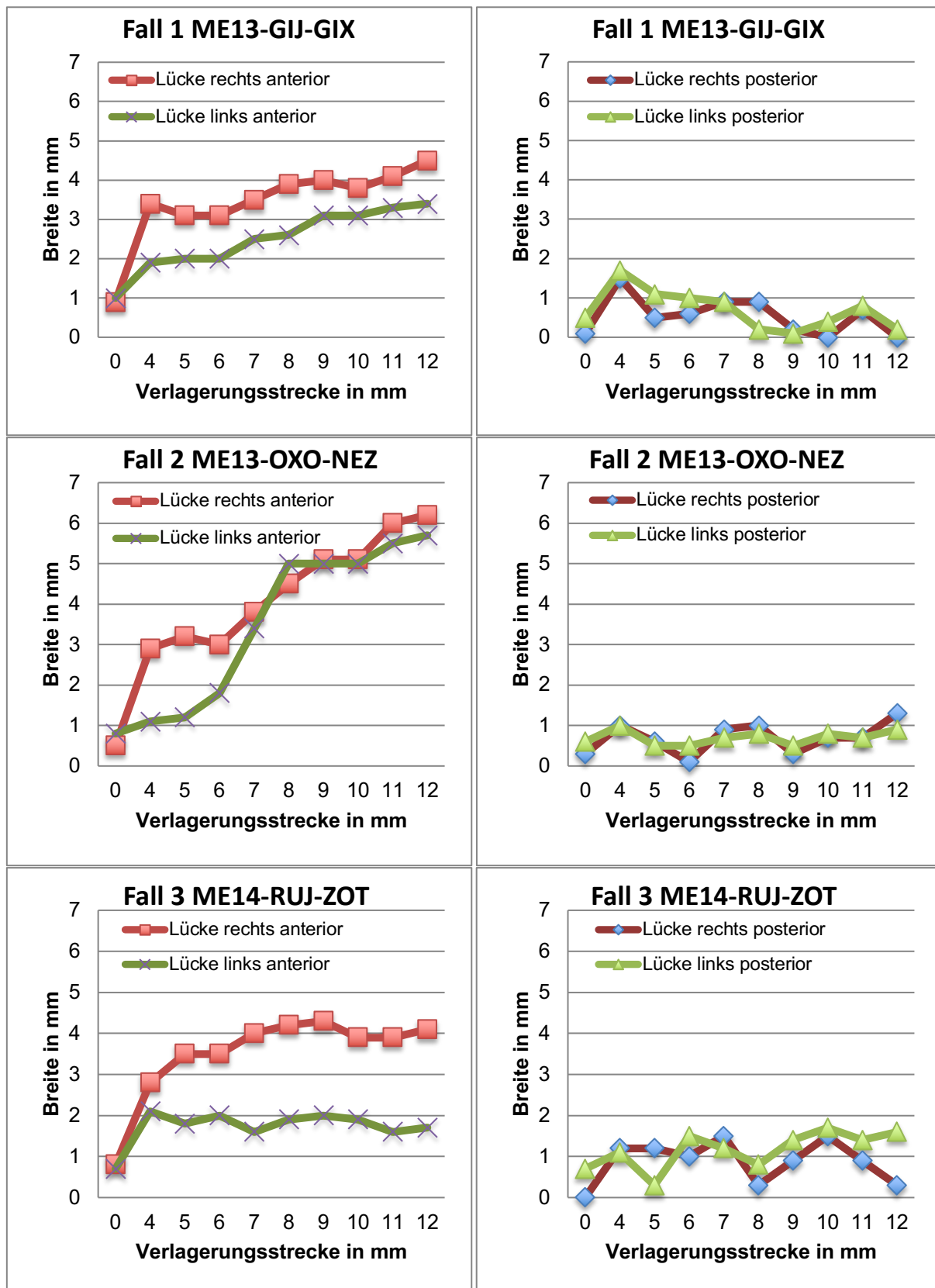


Abbildung 3.16: Liniendiagramme - Knochenlückenbreiten am anterioren (linke Spalte der Diagrammreihen) und posterioren (rechte Spalte der Diagrammreihen) Rand der Anlagerungsflächen der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils rechts und links: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenbreite in mm auf der y-Achse, rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, rechte Seite rot, linke Seite grün (Siehe Anhang Tabellen 2a und 2b).

Bei Rückverlagerung:

Bei inkrementeller Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks mit größer werdender Translation nimmt tendenziell sowohl die anteriore (Liniendiagramme 3.17, Kurven linke Spalte) als auch die posteriore (Liniendiagramme 3.17, Kurven rechte Spalte) Knochenlückenbreite zu. Eine Lücke (Fall 5 ME15-EJU-DUP rechts) weicht von dieser Tendenz ab, wo die Breite der Lücke posterior nicht mit zunehmender Verlagerungsdistanz größer wird.

Die größte anteriore Knochenlückenbreite findet sich bei Fall 5 ME15-EJU-DUP rechts bei 11 mm Rückverlagerung mit einer Breite von 3,4 mm.

Die größte posteriore Knochenlückenbreite findet sich bei Fall 6 ME14-UTA-XOB rechts bei 10 mm und bei 12 mm Vorverlagerung mit einer Breite von 3,2 mm.

Somit sind die anterioren Breiten kleiner als bei Vorverlagerung.

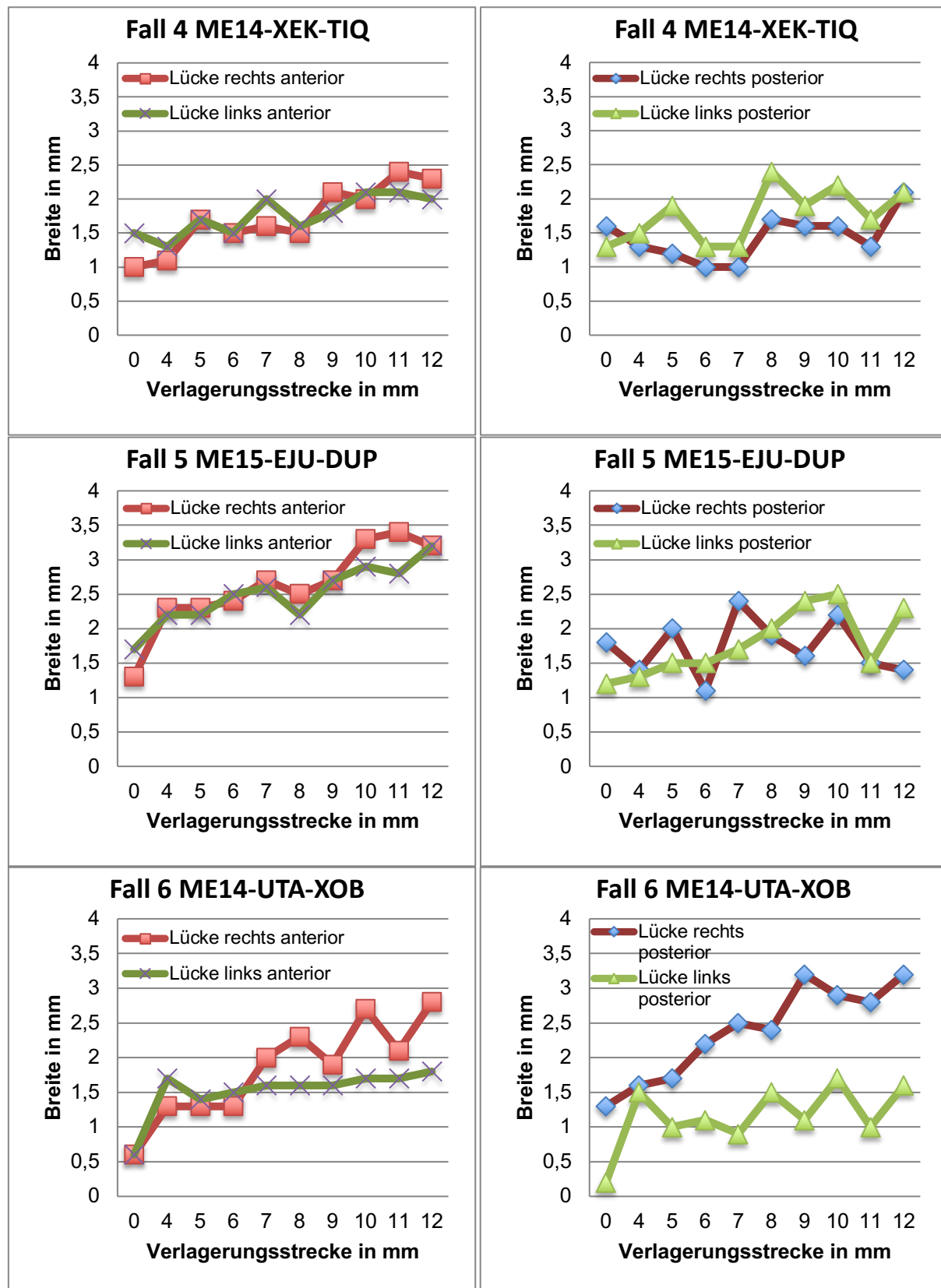


Abbildung 3.17: Liniendiagramme - Knochenlückenbreiten am anterioren (linke Spalte der Diagrammreihen) und posterioren (rechte Spalte der Diagrammreihen) Rand der Anlagerungsflächen der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils rechts und links: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenbreite in mm auf der y-Achse, rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, rechte Seite rot, linke Seite grün (Siehe Anhang Tabellen 2c und 2d).

3.2.2.3 Interkondylarwinkel

Bei Vorverlagerung:

Bei inkrementeller Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks und nicht angelegten lateralen gelenktragenden Ramussegmenten nimmt der Interkondylarwinkel kontinuierlich zu, da sich die Kondylen um die Vertikalachse nach außen drehen („condylar torque“) (Liniendiagramm 3.18). Die entsprechenden Werte bei angelegten lateralen gelenktragenden Ramussegmenten (nach Freigabe der Kondylen) bleiben in allen Fällen konstant, da die Kondylen in ihren Ausgangswinkel zurückkehren.

Die Vergrößerung des Interkondylarwinkels zwischen Beginn und Ende der Vorverlagerung verläuft im Fall 2 ME13-OXO-NEZ kontinuierlich, fast linear. In Fall 1 ME13-GIJ-GIX und Fall 3 ME14-RUJ-ZOT steigen die Werte zu Beginn des Kurvenverlaufs deutlich stärker an als in der zweiten Hälfte.

Die maximale Zunahme des Interkondylarwinkels zwischen Beginn und Ende der Vorverlagerung ergibt sich in Fall 3 ME14-RUJ-ZOT nach einer Distanz von 12 mm. Der Interkondylarwinkel steigt von ursprünglich 131,8° auf 145,5° und vergrößert sich somit um 13,7°.

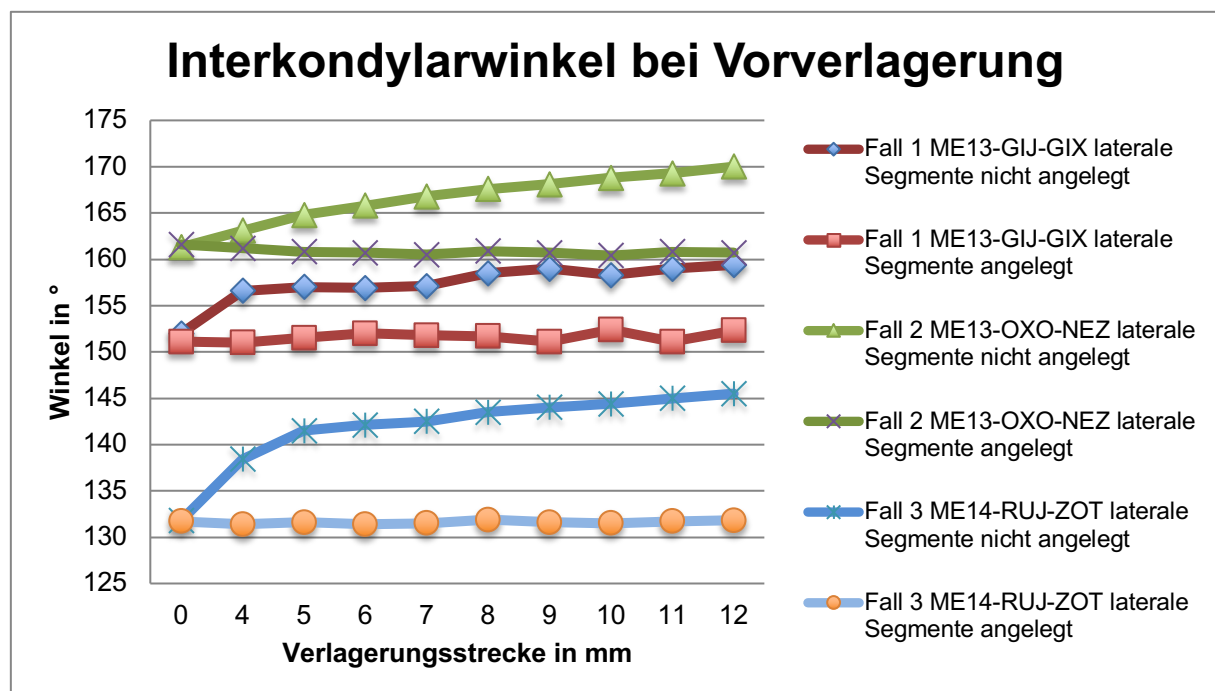


Abbildung 3.18: Liniendiagramm - Interkondylarwinkel der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylarwinkel in Grad auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 1 rot, Fall 2 grün, Fall 3 blau. (Siehe Anhang Tabelle 3a).

Bei Rückverlagerung:

Bei inkrementeller Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks verändert sich der Interkondylarwinkel nicht, da es nicht zu Knocheninterferenzen kommt, die Rotationsbewegungen der Kondylen bewirken (Liniendiagramm 3.19). Die (entsprechenden) Diagrammwerte für angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente sind gleich, da es bei Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmenten „nur“ zu Translationsbewegungen der Kondylen im Sinne des „Medialshifts“ entlang der Transversalachse und nicht zu Rotationsbewegungen kommt.

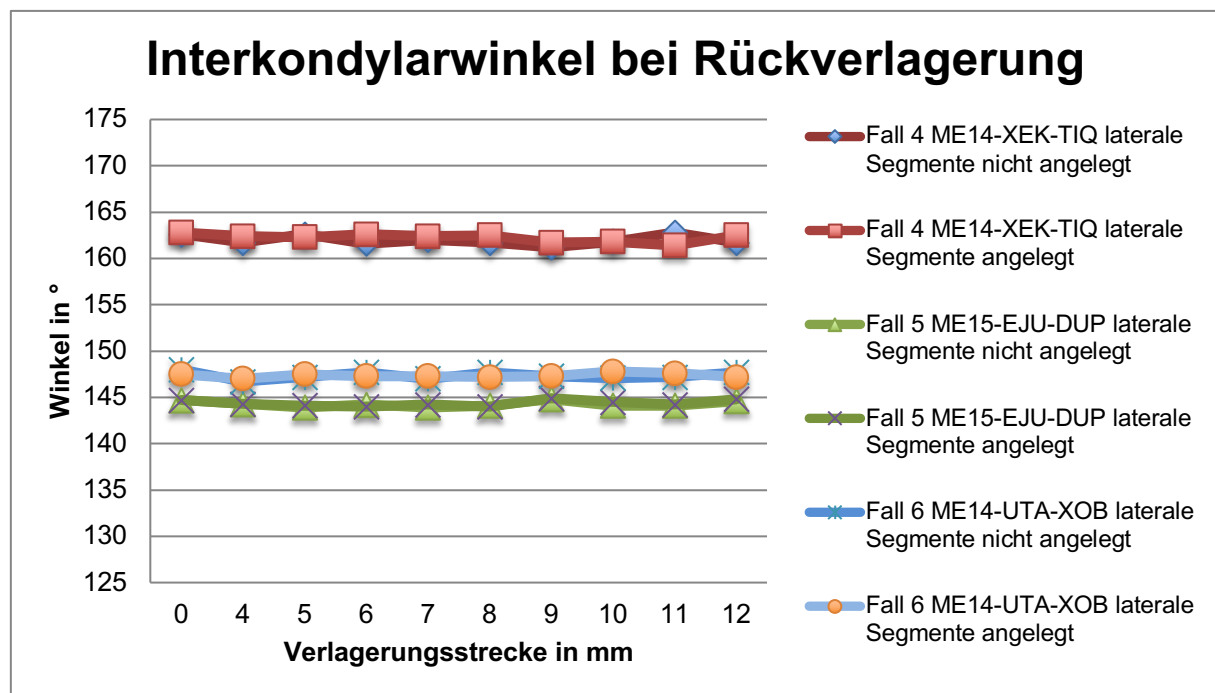


Abbildung 3.19: Liniendiagramm - Interkondylarwinkel der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylarwinkel in Grad auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 4 rot, Fall 5 grün, Fall 6 blau. (Siehe Anhang Tabelle 3b).

3.2.2.4 Interkondylardistanzen

Bei Vorverlagerung:

Bei schrittweiser Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks steigt die Interkondylardistanz kontinuierlich an, wenn die Kondylen freigegeben und die lateralen gelenktragenden Ramussegmente an die Unterkieferspange angelegt werden (Liniendiagramm 3.20). Die (korrespondierenden) Werte bei nicht angelegten lateralen gelenktragenden Ramussegmenten bleiben konstant, da die Kondylen im Modellversuch während der Verlagerung der UK-Spange nicht für Translations- sondern nur für Rotationsbewegungen (um die Sagittal- und Vertikalachse) freigegeben sind.

Die Vergrößerung der Interkondylardistanz zwischen Beginn und Ende der Vorverlagerung verläuft bei allen Fällen fast linear.

Die maximale Zunahme der Interkondylardistanz zwischen Beginn und Ende der Vorverlagerung ergibt sich in Fall 2 ME13-OXO-NEZ nach einer Distanz von 12 mm. Die Interkondylardistanz steigt von ursprünglich 108,4 mm auf 113,7 mm und vergrößert sich somit um 5,3 mm.

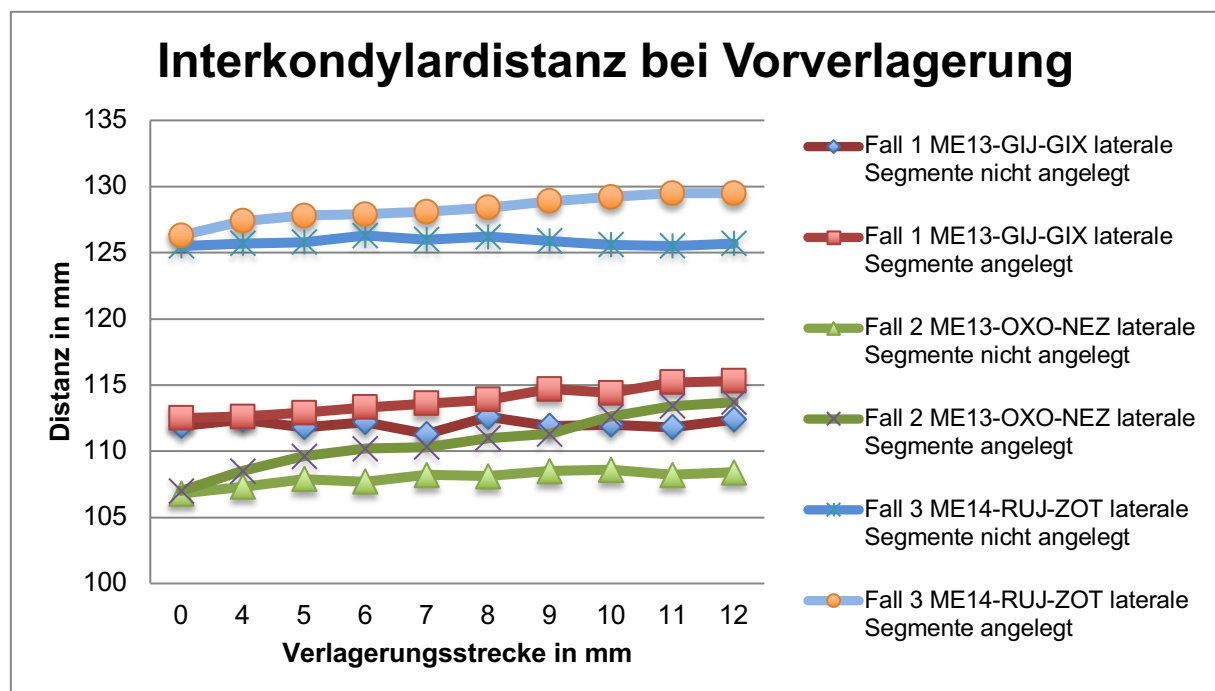


Abbildung 3.20: Liniendiagramm - Interkondylardistanzen der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylardistanz in mm auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 1 rot, Fall 2 grün, Fall 3 blau. (Siehe Anhang Tabelle 4a).

Bei Rückverlagerung:

Bei schrittweiser Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks nimmt die Interkondylardistanz mit zunehmender Translation kontinuierlich ab, wenn die lateralen gelenktragenden Ramussegmente an die Unterkieferspange angelegt werden (Liniendiagramm 3.21).

Die Interkondylardistanz zwischen Anfang und Ende der Rückverlagerung verkleinert sich in allen 3 Fälle eher stufenförmig.

Die maximale Abnahme der Interkondylardistanz zwischen Beginn und Ende der Rückverlagerung ergibt sich in Fall 6 ME14-UTA-XOB nach einer Distanz von 12 mm, wobei die Interkondylardistanz von ursprünglich 110,6 mm auf 107,1 mm sinkt und sich somit um 3,5 mm verkleinert. Die (korrespondierenden) Werte bei nicht angelegten lateralen gelenktragenden Ramussegmenten bleiben konstant, da die Kondylen im Modellversuch während der Verlagerung der UK-Spange nicht für Translations- sondern nur für Rotationsbewegungen (um die Sagittal- und Vertikalachse) freigegeben sind (und weil bei Rückverlagerung keine Knocheninterferenzen auftreten).

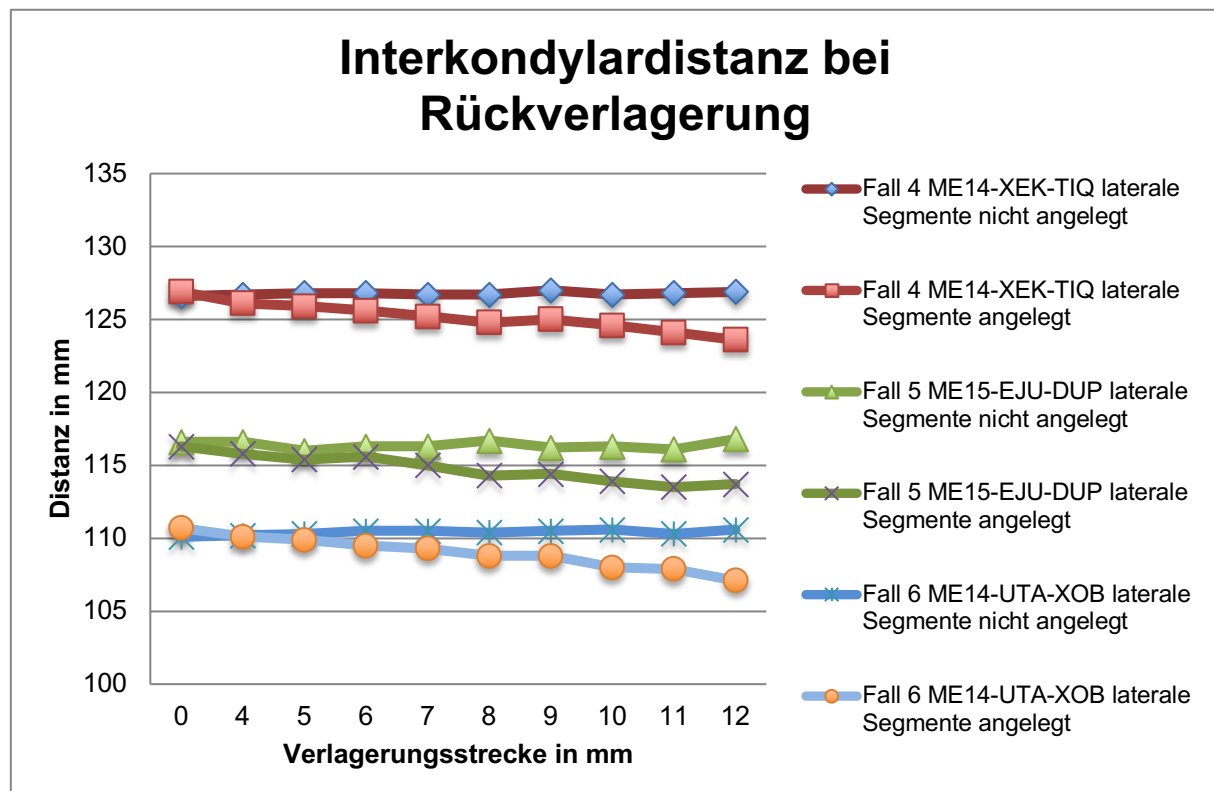


Abbildung 3.21: Liniendiagramm - Interkondylardistanzen der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylardistanz in mm auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 4 rot, Fall 5 grün, Fall 6 blau. (Siehe Anhang Tabelle 4b).

4. Diskussion:

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Zusammenhänge bei bilateralen sagittalen Spaltungsosteotomien (BSSO) zwischen dem bony interface und der Aufrechterhaltung der Gelenkposition, welche wichtig für die Stabilität des Operationsergebnisses und die Vermeidung von CMD Symptomen sind, zu beleuchten.

4.1 Fallbasierte Modelle

Für diese Modellstudie wurden Stereolithographiemodelle von insgesamt 6 Patienten, die in der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der LMU München behandelt wurden, herangezogen. Bei den ausgewählten Fällen handelte es sich um 3 Patienten mit einer mandibulären Retrognathie und um 3 Patienten mit einer mandibulären Prognathie. Bei jeweils 20 verschiedenen Translations- beziehungsweise Kondylenpositionen (Relativverschiebung versus Adaptation) pro Fall wurden 120 Computertomogramme und mehrere hundert Fotos aufgenommen.

Die verhältnismäßig geringe Zahl der Patientenfälle hat den Nachteil, dass keine statistische Auswertung möglich ist. Das Ziel dieser Pilotstudie war es vielmehr erstmals eine dreidimensionale (digitale) Visualisierung der Form des bony interface zu erhalten.

4.2 Methodenkritik

Mit Hilfe analoger und virtueller Methoden - einzeln und in Kombination - ließen sich in den beiden Modellversuchen die Veränderungen der knöchernen Gegebenheiten bei Vor- und Rückverlagerungen und deren reziproker Effekt auf die Position der Kondylen, in Abhängigkeit von der Verlagerungsstrecke, dreidimensional darstellen.

Vor allem der Zusammenhang zwischen der geometrischen Konfiguration des Osteotomiespalts (bony interface) und möglicher Bewegungen der Kondylen konnte durch diese modernen Techniken anschaulich visualisiert und vermessen werden.

In den Modellversuchen wurde die Verlagerung des mandibulo-maxillären Blocks auf reine anteriore oder posteriore Bewegungen limitiert, sodass die Versuchsabläufe mit einer zuverlässigen Messung der Variablen reproduzierbar waren. Dabei war a priori klar, dass die untersuchten sagittalen Translationen nur eine Einflussgröße neben vertikalen und transversalen Translationen, sowie Rotationen um die z-Achse/Sagittalachse („roll“), die x-Achse/Transversalachse („pitch“) und die y-Achse/Vertikalachse („yaw“), darstellen. Die Bewegungen des mandibulo-maxillären Blocks spielen sich in einem kartesischen Koordinatensystem mit 6 Freiheitsgraden ab, entlang von 3 Translations- und 3 Rotationsachsen in welchem schon geringfügige Bewegungen oder Rotationen die Gegebenheiten im bony interface verändern.

Als Translationspositionen während der Vor- beziehungsweise Rückverlagerung wurden die Positionen „0 mm“ sowie in Millimeterschritten von „4 mm bis 12 mm“ gewählt, wobei „0 mm“ die Ausgangsstellung beschreibt. Diese Werte wurden deshalb gewählt, da unter klinischen Aspekten bei Verlagerungen von 0 mm bis 4 mm häufig nur ein sehr geringer Einfluss auf das bony interface zu erwarten ist. Zudem bewegt sich das Ausmaß der Verlagerung der meisten Umstellungsosteotomien im Bereich 4 mm - 12 mm.

Die Planung von orthognathen Eingriffen mittels des 3D-OSS wurde vor ca. 25 Jahren eingeführt. Der 3D-OSS macht dabei den Versuch die Simulation der Umstellungsosteotomie in den anatomischen Bereichen über die dentalen Gipsmodelle von Ober- und Unterkiefer hinaus darzustellen. Dies wird durch verschiedene Registrierhilfen und die Ramusschablonen ermöglicht (Csaszar und Brüker-Csaszar 2000, Kessler et al. 2000).

Die virtuelle Planung von orthognathen Eingriffen mittels dreidimensionaler Bildgebung, interaktiver Websession zwischen dem Operateur und einem „Clinical Engineer“ und STL-Modellen des Gesichtsschädels, sind Methoden, die immer mehr in den Vordergrund der orthognathen Chirurgie rücken.

Im vorliegenden Modellversuch konnten durch die erstmalige Kombination dieser zwei Methoden, alt mit neu, konventionell mit digital, die Vorteile der beiden kombiniert werden. Die aus CT-Daten generierten patientenspezifischen STL-Modelle bildeten die beteiligten anatomischen Strukturen präziser und umfassender ab, als die herkömmlichen dentalen Gipsmodelle und Ramusschablonen, die sonst bei der Planung mit dem 3D-OSS verwendet wurden. So konnten Modelloperationen mit erhöhter Präzision, im Vergleich zur herkömmlichen Methode, durchgeführt werden. Dabei zeigte sich bereits im 3D-OSS Versuch, dass bei Vorverlagerung eine Rotation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um die Vertikalachse („yaw“, „condylar torque“) stattfand. Die anschließende digitale Einsichtnahme durch den CT-Versuch verdeutlichte dann, dass zusätzlich eine Rotation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um eine Sagittalachse („roll“) nach innen, beziehungsweise beim Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente nach außen, stattfand (siehe Abbildung 3.9). Diese Achse lag dabei auf Höhe des Kollisionsbereich der Segmente.

Nachteilig und limitierend in den vorgestellten Modellversuchsreihen war, dass auch mit den neuen Planungstechniken nach wie vor der spätere intraoperative Verlauf der Knochenoberflächen, nach sagittaler Spaltung des Unterkiefers, nicht exakt simulierbar war. Vereinfachend waren an den STL-Modellen und damit in den Versuchsreihen plane geometrische Osteotomieflächen zwischen den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten und der Unterkieferspange vorgegeben, die dann als Grundlage für alle weiteren Schlussfolgerungen angenommen wurden. Tatsächlich entstehen bei einer sagittalen Spaltungsosteotomie in-vivo, von dieser strengen Geometrie abweichende unregelmäßige Knochenoberflächen im Osteotomiespalt beziehungsweise im bony interface. Infolgedessen können intraoperativ Knocheninterferenzen und Lückenbildungen auftreten, die in der Planung nicht vorhersagbar waren. Unter Umständen lassen sich diese Störungen im bony interface während des operativen Eingriffs nicht ohne weiteres identifizieren und ausgleichen, was zu Ungenauigkeiten bei der Übertragung von der virtuellen

Planung in den Operationssitus führt. Diese fehlende Vorhersagbarkeit der Knochenoberflächengeometrie nach sagittaler Spaltungsosteotomie stellten auch Suojanen et al., im Zusammenhang mit der Positionierung und Passgenauigkeit von patientenspezifischen Implantaten zur Refixierung der Segmente, fest (Suojanen et al. 2017).

Weiterhin war die unterschiedliche Morphologie der Unterkiefer, bedingt durch die für jeden Patienten individuelle Anatomie der Mandibula und der Art und dem Ausprägungsgrad der Dysgnathie, zu berücksichtigen.

Die vorliegende Studie hat jedoch Pilotcharakter und nicht die Aufgabe das Aussehen und die Maße des bony interface in Abhängigkeit von den Dimensionen des Unterkiefers in einer mathematischen Formel zu bestimmen.

In der vorliegenden Studie wurden 4 Hauptparameter zur Vermessung des bony interface und der Kondylenbewegung verwendet: Der Knochenlückenöffnungswinkel, die Knochenlückenbreiten, der Interkondylarwinkel und die Interkondylardistanz.

Durch die Vermessung des Knochenlückenöffnungswinkels und die Knochenlückenbreiten im anterioren und posterioren Bereich des Osteotomiespalts konnte die im bony interface entstehende räumliche Konfiguration analysiert und beschrieben werden. Mit diesen Parametern wurde versucht, die Konfiguration des bony interface in geometrische Formen zu fassen (siehe 3.1 und 3.2). Damit konnten die Vorgänge im Osteotomiespalt einerseits anschaulicher gemacht werden, andererseits ließen sich aus den Interkondylarwinkeln und -distanzen erste Rückschlüsse auf Veränderungen der Kondylenposition ziehen.

Nicht vermeidbare Ungenauigkeiten beim Setzen der Bezugspunkte im bony interface waren dabei als methodischer Fehler anzusehen.

Ein Beispiel dafür sind die Werte für die posteriore Knochenlückenbreite bei Vorverlagerungen in 3.2.2.2 (Liniendiagramm 3.16). Aus den in der 3D-OSS Versuchsreihe erhobenen Befunden geht hervor, dass die lateralen gelenktragenden Ramussegmente und die Unterkieferspange im posterioren Bereich des Osteotomiespalts kollidieren (siehe 3.1). Daraus ist zu schließen, dass für die posteriore Knochenlückenbreite am Kollisionspunkt der beiden Segmente für alle

Vorverlagerungsbeträge theoretisch 0 mm zu erwarten wäre. In 3.2.2.2 (Liniendiagramm 3.16) ist zu erkennen, dass diese Werte in geringem Ausmaß von diesem theoretischen Sollwert abweichen. Die gesetzten Bezugspunkte trafen hier nicht immer genau den Punkt, an dem die Segmente im bony interface kollidierten. Die Schwankung der Werte erklärt sich zwanglos durch Unstimmigkeiten beim Setzen der Bezugspunkte in VoXim.

Die Interkondylardistanz und der Interkondylarwinkel wurden bereits in früheren klinischen Studien als Parameter zur Vermessung der Kondylenbewegung vor und nach sagittaler Spaltungsosteotomie des Unterkiefers verwendet, was ihre Verwendung als sinnvolle Parameter stützt (Hackney et al. 1989, Draenert et al. 2010).

Die Interkondylardistanz und der Interkondylarwinkel ließen sich in VoXim nach subjektivem Eindruck mit höherer Genauigkeit als die Messungen im bony interface vermessen. Die Bezugspunkte, die für die Vermessung benötigt wurden (jeweils der lateralste Punkt des rechten und linken Kondylus) konnten durch Auswahl in der sagittalen Schichtung der CT Bilder und anschließender Kontrolle in der 3D reformatierten Ansicht besser identifiziert und ausgewählt werden (siehe 2.4.2), als die Punkte auf den Osteotomieschnittflächen bei der Bestimmung der Knochenlückenbreite und -öffnungswinkel.

Die Interkondylardistanz eignete sich gut um das entgegengesetzte Verhalten der Kondylen, nämlich die Zunahme der Distanz bei Vorverlagerung und Abnahme bei Rückverlagerung aufzuzeigen.

Der Interkondylarwinkel eignete sich gut, den „condylar torque“ bei Vorverlagerungen aufzuzeigen. Limitierend war, dass Rotationsbewegungen um die anderen Raumachsen, zum Beispiel die „roll“ Bewegungen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente bei Vorverlagerung, nicht quantifiziert werden konnten. Bei Rückverlagerungen eignete sich der Interkondylarwinkel gut, ein Ausbleiben von Rotationsbewegungen der Kondylen (wie „yaw“ Bewegungen) aufzuzeigen.

4.3 Ergebnisse – kritische Auseinandersetzung

4.3.1 Knochenlücke und Interferenzen - Form und Veränderungen

Als Parameter zur Beschreibung der Geometrie im Osteotomiespalt beziehungsweise im bony interface, dienten der Knochenlückenöffnungswinkel und die Knochenlückenbreite am hinteren und vorderen Rand der Anlagerungsflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente und der UK-Spange.

Bei Vorverlagerung:

Die Ergebnisse aus den Versuchen bestätigen die im Voraus angestellten Überlegungen: aufgrund der Parabelform der Mandibula mit zunehmendem Interramusabstand dorsal stößt bei Vorverlagerungen der hintere Bereich des medialen Segments an die lateralen gelenktragenden Ramussegmente und drückt diese nach lateral. Dementsprechend kommt es zu einer Rotation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um die Vertikalachse („yaw“ nach außen, „condylar torque“) und um die Sagittalachse („roll“ nach innen). Im anterioren Bereich des Osteotomiespalts bildet sich eine Lücke zwischen den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten und der UK-Spange. Eine forcierte Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente resultiert in einem „Lateralshift“ der Gelenkköpfe. Diese Beobachtungen decken sich mit früheren Annahmen von Lindorf (Lindorf 1986). Er beschrieb daraufhin die Tandemschraubenfixation, wobei die Knochenlücke bzw. das bony interface durch eine Stell- statt einer Zugschraubenosteosynthese offengehalten wird, um die Kondylenposition nicht durch Kompression zu verändern. Jedoch ergaben sich in unserem Versuch Knochenlückenbreiten von bis zu 6,2 mm (siehe 3.2.2.2). Bei der Belassung von Lücken dieser Größenordnung muss die Stabilität von Osteosynthesen kritisch gesehen werden. Zudem sind die Aussichten auf eine spontane Ossifikation fragwürdig. Zur Lösung dieser Problematik bieten sich verschiedene Möglichkeiten an (siehe später 4.4.1).

Die Bestätigung, dass die Form der Knochenlücke ungefähr einem „Keil“ entspricht, ergibt sich, neben der Schichtbreitenanalyse (siehe 3.2.1.1.2 Abbildung 3.8 „heat

map“) auch aus der metrischen Auswertung (siehe 3.2.2.1 und 3.2.2.2): Die Werte für die anteriore Knochenlückenbreite steigen bei zunehmender Vorverlagerung, während die Werte der posterioren Knochenlückenbreite im Rahmen der Messgenauigkeit (vergleiche 4.2) konstant niedrig bleiben. Eine weitere Bestätigung für die Keilform liefern die Knochenlückenöffnungswinkel.

Bei einer Analyse der Mechanismen verschiedener Varianten eines „condylar sag“ nach BSSO zur Unterkiefervorverlagerung gehen Reyneke und Ferretti 2002 offenbar von einer Konfiguration des bony interface aus, die Widersprüche zu den Resultaten der vorliegenden Studie aufweist (Reyneke und Ferretti 2002). Beim „condylar sag“ (deutsch: Senkung, Absackung, Durchbiegung, Durchhang) handelt es sich um Veränderungen der Kondylusposition, die durch Fehlplatzierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente oder durch forcierte Osteosynthese in einer Art Zwangsstellung hervorgerufen werden und zu typischen Okklusionsstörungen führen.

Der „peripheral condylar sag“ vom „type II“ soll darauf beruhen, dass bei Vorverlagerung der Unterkieferspange Knochenlücken im posterioren Bereich der Segmentanlagerungsflächen entstehen. Der forcierte Schluss dieser Lücke (durch rigide Schraubenosteosynthesen) verursacht Druck und Durchbiegungseffekte (gleichzeitig mit einer Minderung der Vertikalhöhe) auf die Knochenkortikalis des lateralen gelenktragenden Ramussegments und führt zum Anpressen des Kondylus an der Medialseite der Fossa articularis.

Nach Lösung der mandibulo-maxillären Fixation (MMF) stellt sich die Biegung der Außenkortikalis zurück und der Kondylus wandert in kaudomedialer Richtung abwärts. Als Folge ist beim unilateralem „peripheral condylar sag“ eine Malokklusion mit dentaler Mittellinienverschiebung zur kontralateralen Seite und offenem Biss auf der ipsilateralen Seite und beim bilateralen „peripheral condylar sag“ ein nach posterior offener Biss und Angle-Klasse III Verzahnung zu beobachten (zum „central condylar sag“ siehe 4.3.2.1) (Reyneke und Ferretti 2002).

Die Annahmen von Reyneke und Ferretti über das Verhalten der Segmente und die räumliche Form des bony interface beruhen auf klinischen Erfahrungen und nicht wie in der vorliegenden Studie auf konkreten dreidimensionalen Modellversuchsreihen.

Bei Rückverlagerung:

Sowohl die 3D-Darstellung mit Schichtbreitenanalyse (siehe 3.2.1.2.2 Abbildung 3.12 „heat map“) als auch die Ergebnisse der quantitativen Auswertung (siehe 3.2.2.1 und 3.2.2.2) zeigen, dass die Geometrie der Knochenlücke einem flachen „Quader“ gleichzusetzen ist, und deswegen im Modellversuch keine Knochenkollisionen auftreten.

Besondere Aspekte ergeben sich im Zusammenhang von Unterkieferrückverlagerungen bei asymmetrischen mandibulären Prognathien (Yang et al. 2010). Yang et al. verglichen Knocheninterferenzen zwischen dem lateralen gelenktragenden und dem medialen Segment bei unterschiedlichen Osteotomietechniken bei asymmetrischen mandibulären Prognathien (Yang et al. 2010). Zur Korrektur der frontalen Asymmetrie ist eine (De-)rotation der Unterkieferspange im Sinne einer „yaw“ Bewegung notwendig. Entlang der verkürzten Hemimandibel kommt es daher zu einem Vorverlagerungseffekt in Kombination mit einer Auswärtsdrehung der Unterkieferspange, auf der langen Unterkieferseite hingegen zu einer Rückverlagerung, wobei je nach Ausprägung der Asymmetrie erhebliche Interferenzen im bony interface auf der verkürzten (deviierten) Unterkieferseite entstehen können.

In einer virtuellen Simulationsreihe an CT-Daten von 20 Patienten mit mandibulären Prognathien und Gesichtsasymmetrie stellte sich heraus, dass konventionelle BSSO zu den umfangreichsten Knocheninterferenzen in Horizontalrichtung führen, während aus kurzen lingualen Spaltungsosteotomien („short lingual split osteotomy“ (SLSO) nach Hunsuck (Hunsuck 1968) die geringsten Kollisionen zwischen den Segmenten resultieren (Yang et al. 2010). Die SLSO rangiert demnach als eine der Ausgleichstechniken (vergleiche 4.4.1) zur Reduktion von Torquierungen des Kondylus („condylar torque“) um die Vertikalachse.

4.3.2 Gelenkstellung (Wechselbeziehung bony interface - Kondylenposition)

Zur Beschreibung der Wechselbeziehungen von bony interface und Kondylenposition wurden als Variablen der Interkondylarwinkel und die Interkondylardistanz, jeweils bei fixierten und freigegebenen Kondylen, gewählt.

Wie es die visuellen Kontrastdarstellungen (siehe 3.2.1.1.2 Abbildung 3.9 und 3.2.1.2.2 Abbildung 3.13) zwischen den Positionen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente vor und nach Freigabe der Kondylen in blau und rot aus der Software Geomagic Qualify besonders gut darstellen, bestätigen sich die bekannten Überlegungen zur Veränderung der Kondylenpositionen bei Vor- und Rückverlagerung der Unterkieferspange (Tuinzing und Swart 1978, Lindorf 1986).

Bei Vorverlagerung:

Neben einem Ausgleich der Torquierung führt eine forcierte Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente im Modellversuch bei UK Vorverlagerungen durch die Kippung über einen punkt- oder linienförmigen Kollisionsbereich am dorsokraniellen Rand der Anlagerungsflächen zu einem „Lateralshift“ der Kondylen, gleichzeitig mit einer Rotation um die Sagittalachse nach außen. Ein Äquivalent für dieses Seitwärtsgleiten findet sich auch in der quantitativen Auswertung für die Interkondylardistanzen und Interkondylarwinkel wieder (siehe 3.2.2.3 und 3.2.2.4).

Im Schrifttum finden sich zahlreiche Untersuchungen zur Veränderung der Kondylenstellung nach BSSO und Unterkiefervorverlagerungen.

Will et al. 1984 untersuchten Veränderungen der Kondylenposition in einer Studie mit 41 Patienten, bei denen eine BSSO mit Vorverlagerung des Unterkiefers und anschließender nicht-rigider Drahtosteosynthese im inneren Kieferwinkel erfolgte (Will et al. 1984). Die Kondylenposition wurde klinisch und radiologisch mittels submento-vertex Schädelaufnahmen und Fernröntgenseitenaufnahmen die präoperativ und während postoperativer Verlaufskontrollen (1 Woche, 6 Wochen und mehr als 12 Wochen) angefertigt wurden, evaluiert.

Dabei fanden sich im perioperativen Intervall keine signifikanten Positionsveränderungen der Kondylen. Während der Phase der mandibulo-maxillären Fixation (MMF) fanden sich signifikante Verlagerungen beider Kondylen nach kranial (durchschnittlich links 1,69 mm, rechts 1,18 mm), sowie Verlagerungen

des linken Kondylus nach posterior (durchschnittlich um 0,89 mm). Als Erklärung wurde der Muskelzug des M. pterygoideus medialis am medialen Segment vermutet, wodurch wiederum die Kondylen nach kranial und posterior gedrückt werden sollen. Nach Entfernung der MMF kam es nicht zu weiteren Änderungen der Kondylenposition.

Will et al. nennen als mögliche Ursachen für die ausgeprägteren Verlagerungen des linken Kondylus die Position des Operators auf der rechten Seite und die dadurch bedingte bessere Erreichbarkeit und Einsicht, sowie den verlängerten Zeitraum bis zur Positionierung des Kondylus auf der zuerst osteotomierten (linken) Seite, in dem sich ein intrakapsuläres Ödem bilden konnte (Will et al. 1984).

Hackney et al 1989 untersuchten die gleichen Parameter wie die vorliegende Studie (Interkondylardistanz und Interkondylarwinkel) vor und nach BSSO mit Vorverlagerung des Unterkiefers und anschließender rigider Schraubenfixation in einer Verlaufsstudie an 18 Patienten, um diese Parameter mit dem Auftreten von craniomandibulären Dysfunktionen (CMD), dem Ausmaß der Vorverlagerung und der Form des Unterkiefers zu korrelieren (Hackney et al. 1989).

Zur Beurteilung der Kondylenposition wurden submento-vertex Schädelaufnahmen präoperativ und 6 – 12 Monate postoperativ verwendet. Postoperativ ließen sich kleinere Positionsveränderungen der Kondylen sowohl nach lateral als auch nach medial feststellen, mit anderen Worten größer und kleiner werdende Interkondylardistanzen. Die Interkondylardistanz nahm durchschnittlich um 0,10 mm ab (bei 5 Patienten wurde sie größer, bei 8 Patienten kleiner und bei 2 Patienten blieb sie unverändert). Der Interkondylarwinkel vergrößerte sich um durchschnittlich 2° (bei 9 Patienten vergrößerte er sich, bei 4 Patienten verkleinerte er sich und bei 2 Patienten blieb er unverändert). Diese Veränderungen der prä- und postoperativen Interkondylardistanzen und der Interkondylarwinkel waren jedoch nicht signifikant. Es konnte zudem keine Korrelation zwischen Veränderungen der Interkondylardistanz oder des Interkondylarwinkels und dem Ausmaß der Vorverlagerung oder der Form des Unterkiefers nachgewiesen werden. Außerdem kam es zu keiner Zunahme von CMD Symptomen.

Hackney et al. 1989 widersprechen deshalb den Annahmen von Lindorf 1986 sowie Tuinzing und Wart 1978, dass die Interkondylardistanz bei Vorverlagerungen des Unterkiefers größer und bei Rückverlagerungen kleiner wird (siehe 1.2), da obwohl in

ihrer Studie ausschließlich Vorverlagerungen des Unterkiefers durchgeführt wurden, sowohl Zu- als auch Abnahmen der Interkondylardistanzen beobachtet wurden (Tuinzing und Swart 1978, Lindorf 1986, Hackney et al. 1989).

Die nicht signifikanten transversalen Verschiebungen der Kondylen seien nicht von Verlagerungsrichtung, Verlagerungsdistanz oder Morphologie der Unterkieferspange abhängig, sondern möglicherweise von der Operationstechnik. Vor Einbringen der Osteosyntheseschrauben erfolgte intraoperativ die Lagesicherung der Segmente zueinander mit einer Stabilisierungsklemme. Die Positionierung der Stabilisierungsklemme und nachfolgend der Osteosyntheseschrauben, habe, gemeinsam mit den knöchernen Kontaktflächen im bony interface, Einfluss auf die lateralen gelenktragenden Ramussegmente und somit auf die Kondylenposition.

Die Autoren erwähnen jedoch auch, dass durch die einmalige Röntgenaufnahme nach 6 – 12 Monaten das postoperative „remodelling“ der Kondylen (lokale Knochenresorption und Knochenneubildung) als Reaktion des Körpers auf Kondylenverschiebungen und die damit verbundene Kondylenpositionsänderungen nicht erfasst wurde. Somit hätten sich in früheren oder späteren Röntgenaufnahmen abweichende Ergebnisse zeigen können (Hackney et al. 1989).

Alder et al. 1999 untersuchten Veränderungen der Kondylenposition an 21 Patienten, die sich einer BSSO mit Vorverlagerung des Unterkiefers und anschließender rigider Schraubenosteosynthese unterzogen (Alder et al. 1999). Die Kondylenposition wurde anhand von CT Aufnahmen, die 1 und 8 Wochen postoperativ durchgeführt wurden, in axialer und sagittaler Schichtung evaluiert. Dabei fanden sich Positionsveränderungen der Kondylen in alle Richtungen um durchschnittlich 1,0 - 1,6 mm, am häufigsten dabei nach lateral und in zweiter Linie nach kranial und posterior (Alder et al. 1999).

Diese am häufigsten auftretenden Transversalverlagerungen der Kondylen stimmen in dieser Hinsicht mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie überein.

Auch Angle et al. 2007 zeigten Bewegungen der lateralen gelenktragenden Segmente in Transversalrichtung (Angle et al. 2007). Sie konnten in einer cephalometrischen Verlaufsstudie anhand von Fernröntgenseitenbildern bei 25 Patienten nach Druckadaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente und rigider Schraubenosteosynthese eine Vergrößerung des Intergonialabstandes um bis

zu 6,5 mm nachweisen. Interessanterweise hatte diese Transversalverlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente keine Auswirkung auf die Okklusion beziehungsweise erzeugte keine Rezidive in der Sagittalrichtung (Angle et al. 2007). Die in der vorliegenden Arbeit ebenfalls beobachteten Transversalverlagerungen nach lateral, wurden jedoch an den Kondylen (als Interkondylardistanz) und nicht wie in der Arbeit von Angle et al. am Kieferwinkel als Intergonialabstand gemessen.

Dem gegenüber steht eine Studie von Draenert et al. 2010, die an 18 Patienten mittels DVT die gleichen Parameter (Interkondylardistanz und Interkondylarwinkel) wie Hackney et al. 1989 und wie die vorliegende Arbeit, vor und nach BSSO und anschließender Miniplattenosteosynthese im Rahmen von mono- und bignathen Eingriffe untersuchten (Draenert et al. 2010). Dabei zeigten sich nur geringfügige, nicht signifikante Veränderungen der Interkondylardistanzen (durchschnittlich 1 mm Vergrößerung) und der Interkondylarwinkel (durchschnittlich 7° Verkleinerung) prä- und postoperativ und damit der Kondylenposition. Allerdings ist einschränkend zu sagen, dass Vorverlagerungen und Rückverlagerungen nicht differenziert betrachtet wurden (Draenert et al. 2010). Da sich nach den oben genannten Überlegungen (Tuinzing und Swart 1978, Lindorf 1986) die Transversalbewegungen der Kondylen bei Vor- und Rückverlagerungen entgegengesetzt verhalten, nivellieren sich Veränderungen der Kondylenpositionen bei fehlender Unterteilung nach der Verlagerungsrichtung.

Chen et al. 2013 untersuchten in einer Verlaufsstudie 31 Patienten nach BSSO und Vorverlagerung des Unterkiefers, in Kombination mit Le-Fort 1 Osteotomie mit anschließender rigider Miniplattenosteosynthese (Chen et al. 2013). Es erfolgten klinische und radiologische Untersuchungen der Kondylenposition präoperativ, unmittelbar postoperativ, 3 Monate postoperativ und 9 - 15 Monate postoperativ mittels DVT. Veränderungen der Kondylenposition waren direkt postoperativ nach posterior und inferior und 3 Monate postoperativ nach posterior und superior und betrugen im Durchschnitt 0,5 – 2 mm.

Trotz dieser Veränderungen wurde kein Anstieg von CMD Symptomen beobachtet (Chen et al. 2013).

Die Ergebnisse der genannten Studien werfen die Frage auf, welche Langzeitauswirkungen Positionsänderungen der Kondylen haben und inwieweit sie von Adaptionsmechanismen des Körpers kompensiert werden können.

Die Arbeitsgruppe um Xi untersuchte ausgiebig mittels 3D Analyse Positionsveränderungen und das „remodelling“ der Kondylen (lokale Knochenresorption und Knochenneubildung (Knochendeposition)) als prognostischen Faktor für skelettale Rezidive (Xi et al. 2015a, Xi et al. 2015b, Xi et al. 2017).

Bei 56 Patienten wurden nach BSSO und Vorverlagerung des Unterkiefers mit anschließender Miniplattenosteosynthese DVT Aufnahmen präoperativ, 1 Woche postoperativ sowie 1 Jahr postoperativ angefertigt.

Xi et al. 2015a untersuchten Rotationsbewegungen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente und deren Einfluss auf skelettale Rezidive und kondyläres „remodelling“ (Xi et al. 2015a).

Die lateralen gelenktragenden Ramussegmente hatten dabei die Tendenz (72%), direkt postoperativ „counterclockwise“ (nach anterior um die Transversalachse) rotiert zu sein (durchschnittlich um 1,5°). In der anschließenden follow-up Periode rotierten sie um weitere 0,6°. Das Vorkommen von „counterclockwise“ Rotationen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente korrelierte mit dem Auftreten von Rezidiven in Sagittalrichtung.

Es kam außerdem direkt postoperativ zu einer nicht signifikanten Rotation um die Vertikalachse nach außen um durchschnittlich 0,3° („condylar torque“) und in der follow-up Periode zu einer umgekehrten Rotation nach innen (durchschnittlich 2,0°).

Die Interkondylardistanz vergrößerte sich im Sinne eines „Lateralshifts“ der lateralen gelenktragenden Ramussegmente postoperativ signifikant um 0,7 mm, was mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie übereinstimmt. Xi et al 2015a beobachteten in der anschließenden follow-up Periode wiederum eine Verkleinerung der Interkondylardistanz um 0,9 mm, also eine Rückkehr der lateralen gelenktragenden Ramussegmente in die präoperative transversale Position. Der „Lateralshift“ und der „condylar torque“ waren nicht mit dem Auftreten von „remodelling“ oder skelettalen Rezidiven assoziiert. Deshalb schätzen Xi et al. die Auswirkungen dieser Kondylenverschiebungen auf die postoperative Funktion und Stabilität als gering ein.

Da sich die Interkondylardistanz nur um 0,7 mm vergrößerte, die Intergonialdistanz jedoch um 3,3 mm, schlussfolgern die Autoren, dass der „Lateralshift“ durch eine Rotation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um eine (Sagittal-)Achse auf Höhe (bzw. leicht oberhalb) der Kondylen zustande kommt.

Dies steht im Kontrast zu der vorliegenden Arbeit, in der die Rotationsachse auf Höhe des Kollisionsbereich der lateralen gelenktragenden Ramussegmente mit dem medialen Segment lag und es durch eine Kippung über diesen punkt- oder linienförmigen Kollisionsbereich am dorsokraniellen Rand der Anlagerungsfläche der Segmente zu einem „Lateralshift“ der Kondylen und einer Rotation um eine Sagittalachse nach außen („roll“) kam (siehe Abbildung 3.9).

Dies kann erklären, warum im Vergleich die Vergrößerungen der Interkondylardistanz in der vorliegenden Studie größer waren.

In der Studie von Xi et al 2015a waren weitere prognostische Faktoren für das Auftreten von Rezidiven postoperatives „remodelling“ der Kondylen, ein großes Ausmaß an Vorverlagerung, weibliches Geschlecht, junge Patienten und das präoperative Kondylenvolumen (Xi et al. 2015a).

Den Volumenverlust durch „remodelling“/kondyläre Resorptionen quantifizierten Xi et al. 2015b in einer weiteren Arbeit am selben Patientenkollektiv durch eine 3D Analyse und untersuchten dessen Einfluss auf skelettale Rezidive (Xi et al. 2015b).

Bei 55% der Kondylen kam es postoperativ zu einem verkleinerten Kondylenvolumen, durchschnittlich um 6,1%. Das Ausmaß des kondylären „remodellings“ korrelierte mit dem Auftreten von skelettalen Rezidiven in Sagittalrichtung, welches durchschnittlich 0,71 mm betrug. Xi et al. konnten zeigen, dass es ab einer kondylären Volumenreduktion von mehr als 17% zu skelettalen Rezidiven und klinischen Zeichen der Kondylenresorption kam. Die Autoren schlussfolgern, dass das kondyläre Volumen ein geeigneter Parameter ist, um skelettale Rezidive und progressive Kondylenresorption zu diagnostizieren oder sogar vorausszusagen (Xi et al. 2015b).

In Bezug auf das Patientenkollektiv der beiden genannten Studien ist zu sagen, dass die durchschnittliche Vorverlagerungsdistanz 4,6 mm betrug. Die Testreihen der vorliegenden Arbeit begannen erst bei 4 mm und reichten bis 12 mm Vor- oder

Rückverlagerung. Somit überschneidet sich der untersuchte Verlagerungsbereich nur äußerst partiell.

Eine follow-up Studie von der gleichen Autorengruppe um Xi untersuchte das kondyläre „remodelling“ und skelettale Rezidive nach 2 Jahren, jedoch an einem anderen Patientenkollektiv (Xi et al. 2017). Xi et al 2017 untersuchten 50 Patienten, die sich bignathen Umstellungsosteotomien mit BSSO und Vorverlagerung des Unterkiefers mit anschließender Miniplattenosteosynthese unterzogen mittels DVT (präoperativ, 1 Woche postoperativ sowie 2 Jahre postoperativ).

In diesem Patientenkollektiv betrug die durchschnittliche Unterkiefervorverlagerung 7,8 mm und das durchschnittliche skelettale Rezidiv in Sagittalrichtung 2 Jahre postoperativ 1,3 mm. 78% der Kondylen hatten ein Volumenreduktion von durchschnittlich 12,5%. Dieser Volumenverlust korrelierte wiederum mit skelettalen Rezidiven des Unterkiefers, jedoch nicht des Oberkiefers.

Besonders eine dorsale Impaktierung des Oberkiefers beziehungsweise des mandibulo-maxillären Blocks sowie Bewegungen des Unterkiefers nach anterior und inferior führten zu einem hohen Risiko für Kondylenresorptionen. Interessanterweise war in dieser follow-up Studie über 2 Jahre der postoperative „Lateralshift“ der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (also die Vergrößerung der Intergonial- und Interkondylardistanz) im Kontrast zu Xi et al. 2015a und Xi et al. 2015b ebenfalls ein prädiktiver Faktor für postoperativen Volumenverlust der Kondylen, jedoch ohne Effekt auf postoperative skelettale Rezidive. Dieser fehlende Effekt wird durch die Tendenz der lateralen gelenktragenden Ramussegmente, in der anschließenden follow-up Periode durch umgekehrte Bewegungen in ihre Ausgangsposition zurück zu kehren, erklärt (Xi et al. 2017).

Es zeigt sich also, dass der Körper über einen gewissen postoperativen Zeitraum auf Veränderungen der Kondylenposition durch Anpassungsmechanismen wie Knochenresorption und -deposition („remodelling“) reagiert. Diese Umbauprozesse der Kondylen haben jedoch einen (negativen) Effekt auf die postoperative skelettale Stabilität.

Auch Méndez-Manjón et al. 2016 nutzten eine 3D-Analyse um Positionsveränderungen des Kiefergelenks zu untersuchen (Méndez-Manjón et al.

2016). In einer prospektiven Verlaufsstudie wurden 22 Patienten nach BSSO und Vorverlagerung mit anschließender Miniplattenfixation mittels DVT Aufnahmen, die 15 Tage präoperativ und 15 Tage postoperativ angefertigt wurden, untersucht. Es zeigten sich signifikante Veränderungen der Kondylenposition in alle Richtungen (durchschnittlich um 0,7 mm – 1,1 mm) außer nach inferior, wobei eine Korrelation zwischen dem Ausmaß der Vorverlagerung des Unterkiefers und den Verschiebungen des linken Kondylus, jedoch nicht des rechten Kondylus, bestand. Als mögliche Erklärung hierfür wird die Position des Operators auf der rechten Seite des Patienten genannt (Méndez-Manjón et al. 2016). Dies deckt sich mit der Erklärung von Will et al. 1984, die ebenfalls die Position des Operators auf der rechten Seite als möglichen Grund für die größere Verlagerung des linken Kondylus anführen, da der Operator die ihm nähere Seite besser einsehen und erreichen kann (Will et al. 1984). Dieser Faktor trat bei der vorliegenden Modellstudie naturgemäß nicht ins Gewicht.

Miao et al. 2018 untersuchten in einer retrospektiven Langzeitstudie an 37 Patienten die postoperative Stabilität bzw. Rezidive in Bezug zu Positionsveränderungen des Kiefergelenks nach BSSO und Vorverlagerung des Unterkiefers in Kombination mit Le-Fort 1 Osteotomie und anschließender rigider Fixation (Miao et al. 2018). Die Analyse erfolgte mittels MRT und Fernröntgenseitenaufnahmen, welche vor Beginn der kieferorthopädischen Behandlung, nach dem operativen Eingriff und mindestens 5 Jahre nach Behandlungsabschluss angefertigt wurden.

Dabei zeigte sich, dass Verlagerungen des Kiefergelenkköpfchens nach inferior und posterior (durchschnittlich um 0,5 – 1,5 mm) mit mandibulären Rückwärts- bzw. Rezidivbewegungen in der Sagittalebene korrelierten.

Im Kontrast zur vorliegenden Arbeit wurden nur Bewegungen in der Sagittal- und Vertikalebene, nicht jedoch in der Transversalebene untersucht (Miao et al. 2018).

Costas et al. 2018 untersuchten in einer prospektiven klinischen Studie 17 Patienten nach BSSO und Unterkiefervorverlagerung auf Translations- und Rotationsbewegungen und eruierten mögliche Vorhersagbarkeiten dieser Bewegungen mit mathematischen Formeln (Costas et al. 2018). In die Studie eingeschlossen wurden 25 Kondylen, auf deren Seite eine Vorverlagerung des Unterkiefers erfolgte. Durch asymmetrische Verlagerungsbewegungen des

Unterkiefers, erfolgte bei 9 von 34 Kondylen auf einer Seite des Unterkiefers keine Vorverlagerung. Zur Fixation wurde rigide bikortikale Schraubenosteosynthese verwendet. Positionsveränderungen der Kondylen wurden mittels CT und Fernröntgenseitenbildern 2 Wochen präoperativ und 1 Jahr postoperativ analysiert. Die Positionsveränderungen der Kondylen korrelierten mit der relativen Vorverlagerungsstrecke, das heißt der absoluten Vorverlagerungsstrecke im Verhältnis zur Größe des Unterkiefers. Darüber hinaus konnten anteroposteriore (0 – 2,5 mm) und kraniokaudale (0 – 1,5 mm) Kondylenverschiebungen, sowie Rotationen um alle 3 Raumachsen (0 – 8°) mit mathematischen Formeln vorhergesagt werden. Diese Positionsveränderungen hatten im Gegensatz zu den Arbeiten von Xi et al. (Xi et al. 2015a, Xi et al. 2015b, Xi et al. 2017) und Angle et al. 2007 (Angle et al. 2007) keine Auswirkung auf die postoperative Stabilität. Mediolaterale Verschiebungen (0 – 2 mm) der Kondylen waren, vor allem bei größeren Vorverlagerungsdistanzen des Unterkiefers, nicht reproduzierbar (Costas et al. 2018).

Bei Rückverlagerung:

Bei Rückverlagerung kommt es beim Anlagern der lateralen gelenktragenden Ramussegmente durch Schluss der entstandenen Knochentrücken zu einem „Medialshift“ der Kondylen.

Die Interkondylardistanz nimmt beim Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente an die Unterkieferspange ab und dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Verlagerungsdistanz nach dorsal (siehe 3.2.2.4).

Diese Ergebnisse bestätigen Überlegungen im Schrifttum, zur Veränderung der Kondylenpositionen bei Rückverlagerung der Unterkieferspange (Tuinzing und Swart 1978, Lindorf 1986).

In der Literatur finden sich zahlreiche weitere Untersuchungen zu Veränderungen der Kondylenpositionen nach BSSO und Rückverlagerung der Unterkieferspange.

Kundert und Hadjiangelou 1980 verglichen an 35 Patienten röntgenologisch den Effekt unterschiedlicher Osteosynthesearten auf Kondylenverlagerungen nach BSSO und Vor- oder Rückverlagerung des Unterkiefers (Kundert und Hadjiangelou 1980).

Bei 17 Patienten erfolgte nach BSSO eine (umschlingende) Drahtosteosynthese, bei 18 eine rigide Zugschraubenosteosynthese (nach Spiessl 1974). Es wurden lineare Tomographieaufnahmen, laterale Kiefergelenksaufnahmen und Schädel p.a.-Aufnahmen (posterior-anterior) direkt präoperativ und 2-5 Wochen postoperativ durchgeführt.

Auffällig war, dass es bei Rückverlagerungen bei Verwendung der Zugschraubenosteosynthese signifikant häufiger zu Einwärtsrotationen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um die Vertikalachse kam.

Die Autoren schlussfolgern, dass die Art und das Ausmaß der Verlagerung der Kondylen mit der Verlagerungsrichtung des Unterkiefers und mit der Art der Osteosynthese zusammenhängt (Kundert und Hadjianghelou 1980).

Im Kontrast, waren in der vorliegenden Arbeit die Verlagerungen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente bei Rückverlagerungen des medialen Segments keine Rotationsbewegungen, sondern transversale Translationsbewegung im Sinne eines „Medialshifts“ der Kondylen.

Einwärtsrotationen um die Vertikalachse konnten auch Spitzer et al. 1984 feststellen, die an 10 Patienten mittels prä- und postoperativen CT Aufnahmen Positionsveränderungen der Kondylen nach BSSO mit Rückverlagerung und rigider Schraubenosteosynthese untersuchten (Spitzer et al. 1984). Bei 14 der 20 untersuchten Kondylen kam es zu einer Einwärtsrotation um die Vertikalachse (um 1 – 18°). Die Interkondylardistanz war postoperativ bei 4 Patienten reduziert, bei 4 Patienten vergrößert, bei 1 Patienten unverändert und bei 1 Patienten nicht messbar (Spitzer et al. 1984). Es bleibt jedoch offen, welchen Einfluss die Zugschraubenosteosynthese auf die Kondylenbewegungen hatte.

Um Einwärtsrotationen der Kondylen um die Vertikalsalachse zu vermeiden, verwendeten Ueki et al. 2001 speziell gebogene semi-rigide Miniplatten aus Titan, zur Fixation der Segmente nach BSSO und Unterkieferrückverlagerung, an 20 Patienten mit asymmetrischen mandibulären Prognathien (Ueki et al. 2001). Wie bereits erwähnt, kommt es bei der Behandlung asymmetrischer Prognathien durch BSSO regelmäßig zu ausgeprägten Lückenbildungen im bony interface mit daraus resultierenden Kondylenverschiebungen (siehe 4.3.1 S. 93).

Die Miniplatten, die präoperativ mit Hilfe von submento-vertex Röntgenaufnahmen und Modelloperationen vorgebogenen wurden, halten die Lücken zwischen den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten und dem medialen Segment offen und sollen so eine Einwärtsrotation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente vermeiden (siehe auch 4.4.1) (Ueki et al. 2001).

In einer Folgearbeit untersuchten Ueki et al. 2008 den Effekt der vorgebogenen Miniplatten auf horizontale Kondylenverschiebungen nach BSSO und Rückverlagerung des Unterkiefers (Ueki et al. 2008). Von insgesamt 47 Patienten unterzogen sich 24 nur einer BSSO, während bei 23 Patienten eine bignathe Umstellungsosteotomie erfolgte. Es wurden CTs präoperativ und 3 Monate postoperativ angefertigt.

Es kam zu keinen signifikanten Rotationsbewegungen um die Vertikalachse und keinen Kondylenverschiebungen in Sagittal- und Transversalrichtung (Ueki et al. 2008). Einschränkend ist zu sagen, dass Translationen in der Vertikalebene sowie Rotationen um die Sagittalachse („roll“) und die Transversalachse („pitch“) nicht untersucht wurden.

Lee und Park et al. 2002 untersuchten in einer CT Studie an 30 Patienten mit mandibulären Prognathien die dreidimensionalen Verlagerungseffekte auf die Kondylen nach Unterkieferrückverlagerungen durch BSSO und rigider Schraubenosteosynthese (Lee und Park 2002). Die CT Untersuchungen wurden 1 Monat präoperativ und 1 Monat postoperativ durchgeführt. Es kam zur Verlagerung der Kondylen nach inferior (durchschnittlich um 0,36 mm), zur Einwärtsrotation um die Vertikalachse (durchschnittlich um 4,0°) und Rückwärtsrotation („clockwise“) um die Transversalachse (durchschnittlich um 2,32°). Eine Korrelation zwischen der Größe der Verlagerungsstrecke und der Veränderung der Kondylenposition ließ sich nicht herstellen (Lee und Park 2002).

Genau wie die Untersuchungen zu Verlagerungen der Kondylen, gehen auch die Bestrebungen weiter, Positionsveränderungen der Kondylen durch geeignete condylar positioning devices (CPD) zu vermeiden.

Kim et al. 2014b untersuchten in einer prospektiven klinischen Studie an 20 Patienten Kondylenverschiebungen nach BSSO und Rückverlagerung des Unterkiefers mit intraoperativer Positionierung der Kondylen mittels einer CAD/CAM

gefertigten Positionierungshilfe und anschließender semirigider Schrauben- und Miniplattenosteosynthese (Kim et al. 2014b). Es erfolgten radiologische Untersuchungen der Kondylenposition 1 Monat präoperativ und 1 Tag postoperativ mittels CT. Die Analyse der CTs erfolgte in axialer, frontaler und sagittaler Schichtung.

Es kam zu signifikanten Bewegungen nach inferior (durchschnittlich um 0,14 mm) und nicht signifikanten Bewegungen nach posterior (durchschnittlich um 0,09 mm) sowie Rückwärtsrotationen („clockwise“) um die Transversalachse (durchschnittlich um 0,22°).

Zudem kam es zu signifikanten Innenrotationen um die Vertikalachse (nach medial) und Translationsbewegung nach lateral, jedoch im Mittelwert um weniger als 1 mm beziehungsweise 1°. Die Autoren bewerten diese geringen Kondylenverlagerungen als klinisch insignifikant und schlussfolgern, dass die Positionierungshilfe im Vergleich zur manuellen Kondylenpositionierung ohne CPD eine effektivere Methode darstellt, um Kondylenverschiebungen zu vermeiden (Kim et al. 2014b).

Die Effektivität und Notwendigkeit von CPDs wird jedoch nach wie vor kontrovers diskutiert (Al-Moraissi et al. 2017). Es steht jedoch fest, dass kurz- und langfristige skelettale Rezidive wichtige Komplikationen bei der BSSO sind (Hwang et al. 2014). Diskrepanzen der Kondylenposition von prä- zu postoperativ müssen als wesentliche Ursache skelettaler und okklusaler Instabilität angesehen werden, die wiederum direkt post-operativ oder verzögert in Form von Malokklusionen und Rezidiven auftreten können (Ellis 1994).

Eine weiterer Vorschlag zur Vermeidung von Kondylenverschiebungen und Aufrechterhaltung skelettaler Stabilität, ist das „intended manual condylar positioning“ (deutsch: beabsichtigte/bewusste manuelle Kondylenpositionierung) nach Hwang et al. (Hwang et al. 2014). Dabei erfolgt die intraoperative Positionierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente mittels manueller Positionierung des Kondylus 2 mm anterior der kranialsten Position des Kondylus in der Fossa, die stabil und reproduzierbar ist.

Zugrunde liegt dabei die Annahme, dass bei Rückverlagerungen intraoperativ vermehrt „clockwise“ Rotationen (Rotation nach posterior) der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um die Transversalachse durchgeführt werden, was postoperativ durch muskulären Gegenzug zu „counterclockwise“ Rotationen der

lateralen gelenktragenden Ramussegmente und somit zu Rezidiven führen kann (siehe auch 4.3.2.1). Eine leicht anteriore Positionierung der Kondylen, soll direkt postoperativ auftretende Rezidive reduzieren, weil dadurch eine durch Muskelzug bedingte Rotation der lateral gelenktragenden Ramussegmente kompensiert werden soll (Hwang et al. 2014).

Park et al. 2018 untersuchten in einer 3D-Analyse an 18 Patienten Kondylenverschiebungen nach BSSO (nach Hunsuck 1968) und Rückverlagerung des Unterkiefers mit dieser bewussten manuellen Kondylenpositionierung und anschließender rigider Miniplattenosteosynthese (Park et al. 2018). 14 der 18 Patienten unterzogen sich einer bignathen Operation mit LeFort I Osteotomie des Oberkiefers.

Es erfolgten radiologische Untersuchungen der Kondylenposition präoperativ, 3 Tage postoperativ und 6 Monate postoperativ mittels DVT.

Es fanden sich signifikante Positionsveränderungen der Kondylen direkt postoperativ nach inferior (durchschnittlich um 2,88 mm). Die Kondylen rotierten direkt postoperativ um die Vertikalachse nach innen (durchschnittlich um 0,52°) und um die Sagittalachse nach außen (durchschnittlich um 1,42°). Im Verlauf rotierten sie auf ihre präoperative Ausgangsposition zurück. Alle Rotationsbewegungen waren jedoch nicht signifikant. Die Autoren schlussfolgern, dass die vorgeschlagene manuelle Positionierung der Kondylen spätere Verschiebungen minimiert und für mehr postoperative skelettale Stabilität sorgt (Park et al. 2018).

Die genannten Studien zeigen, dass auch bei Rückverlagerungen des Unterkiefers Veränderungen der Kondylenpositionen postoperative Komplikationen, wie kondyläre Resorptionen beziehungsweise Rezidive durch kondyläre Resorptionen und craniomandibuläre Dysfunktionen (CMD), relevant werden lassen (Kerstens et al. 1990, Moore et al. 1991, Merkx und Van Damme 1994, Cutbirth et al. 1998, Hoppenreijts et al. 1998, Hwang et al. 2000, Hwang et al. 2004, Xi et al. 2015a, Xi et al. 2015b).

Katsumata et al. 2006 zeigten in einer Studie an 85 Patienten, dass es bei Veränderungen der Kondylenposition durch Rückverlagerungen des Unterkiefers innerhalb von 6 – 18 Monaten zum „remodelling“, das heißt Knochenresorption und -

anbau (Deposition), der Kondylen kommen kann (Katsumata et al. 2006). Von den 85 Patienten wurden 39 Patienten mittels BSSO und Miniplattenosteosynthese und 46 Patienten mittels „intraoraler vertikaler Ramusosteotomie“ (IVRO) ohne rigide Osteosynthese behandelt. Die Positionsänderungen und das „remodelling“ der Kiefergelenke wurden durch Röntgen-, CT und MRT Aufnahmen zu mehreren Zeitpunkten präoperativ und bis zu 2 Jahre postoperativ analysiert.

Nach IVRO kam es bei 79 aus 92 Kondylen (85,9%) zu einer Positionsänderung im Sinne einer Rotation um die Vertikalachse nach außen (durchschnittlich um $5,2^\circ$), wohingegen es nach BSSO nur zu minimalen Rotationsbewegungen kam (durchschnittlich um 0°).

Zum „remodelling“ kam es nach IVRO bei 47 von 92 Kondylen (51.1%), nach BSSO bei 8 von 78 Kondylen (10.3%). Das beobachtete „remodelling“ bestand hierbei aus Knochenanbau (Deposition) an der Dorsalfläche des Kondylus. Zudem zeigte sich eine positive Korrelation zwischen dem Ausmaß postoperativer Rotationen und dem Auftreten von „remodelling“ an den Kondylen.

Die im Vergleich zur BSSO deutlich höhere Inzidenz an Kondylenverlagerungen und „remodelling“ nach IVRO erklären die Autoren durch die fehlende rigide Osteosynthese bei der IVRO, die zu Verlagerungen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente durch die Operation und durch den Muskelzug des M. pterygoideus lateralis geführt haben könnte (Katsumata et al. 2006).

Die Untersuchungen von Katsumata et al. 2006 wurden durch eine aktuelle Studie von Hwang et al. 2019, die die Adaptationsfähigkeit der Gelenkköpfchen durch „remodelling“, nach Verlagerungen der Kondylenposition untersuchte, ergänzt (Hwang et al. 2019). Die retrospektive Kohortenstudie umfasste 30 Patienten mit BSSO und Unterkieferrückverlagerung und anschließender semi-rigider Fixation durch eine Miniplatte mit 4 monokortikalen Schrauben. DVT Aufnahmen wurden direkt postoperativ und 6 Monate postoperativ angefertigt. Bei mediolateralen und anteroposterioren Verlagerungen des Kondylus führte eine Verlagerung in eine Richtung dabei zu Resorptionen des Kondylus auf der gleichen Seite/Fläche und zu Knochenanbau (Deposition) auf der entgegengesetzten Seite/Fläche. An der superioren Kondylenfläche kam es unabhängig von der Richtung der Verlagerung zu Resorptionen (Hwang et al. 2019).

Sowohl bei Vorverlagerungen als auch bei Rückverlagerungen des Unterkiefers wird ein späteres kondyläres „remodelling“ - als Adaptationsmechanismus - bestimmt von der Richtung und dem Ausmaß der Kondylenpositionsveränderung durch den chirurgischen Eingriff (Katsumata et al. 2006, Xi et al. 2015a, Xi et al. 2015b, Hwang et al. 2019).

Die Korrelation von vermehrtem postoperativem „remodelling“ mit dem Auftreten von skelettalen Rezidiven (Xi et al. 2015b, Xi et al. 2017) zeigt, dass diese Mechanismen zur Kompensation oftmals nicht ausreichen. Es erscheint deshalb empfehlenswert, Veränderungen der Kondylenposition wenn immer möglich zu vermeiden, um die Stabilität des Operationsergebnisses zu sichern.

4.3.2.1 Weitere Translations- und Rotationsbewegungen der Kondylen

Außer den in diesem Modellversuch untersuchten Translationsbewegungen der Kondylen nach lateral und medial und Rotationsbewegungen um die Sagittal- und Vertikalachse, können noch andere Translations- und Rotationsbewegungen der Kondylen bei Umstellungsosteotomien des Unterkiefers relevant werden.

Yang und Hwang haben ausgiebig Rotationsbewegungen der Kondylen um die Transversalachse („clockwise“ und „counterclockwise“ Rotationen) bei Rückverlagerungen untersucht (Han et al. 2014, Yang und Hwang 2014b, Yang und Hwang 2018). Diese Rotationsbewegungen werden hauptsächlich benutzt bei intraoperativen Ausgleichsversuchen von knöchernen Stufen im Bereich des Unterkieferendes im Rahmen von bignathen Umstellungsosteotomien bzw. Verlagerungen des mandibulo-maxillären Blocks. Ein Ausgleich dieser Stufen hat den Vorteil, dass die Knochenanlagerungsflächen der Segmente vergrößert und Knochenstufen vermieden werden.

Werden „clockwise“ Rotationen (Rotation nach posterior) der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um die Transversalachse intraoperativ durchgeführt, dann kann postoperativ der Gegenzug der Muskelschlinge aus Musculus pterygoideus medialis und Musculus masseter zum Wiedererreichen ihrer Ausgangslänge zu „counterclockwise“ Rotationen der lateralen gelenktragenden

Ramussegmente und somit zu Rezidiven führen (Komori et al. 1989, Kim et al. 2007, Yang und Hwang 2014b).

Eine Möglichkeit übermäßige „clockwise“ Rotationen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente zu vermeiden, ist die dorsale Impaktierung des Oberkiefers beziehungsweise des mandibulo-maxillären Blocks. Derartige Ausgleichsbewegungen sind jedoch limitiert und nicht immer möglich, beispielsweise wenn dadurch das Kinn zu stark nach posterior rückt. Yang und Hwang empfehlen in solchen Fällen die Beibehaltung der originären Ramus- und Kondylenposition (ohne Ausgleich der Stufe am Unterkieferrand) und schlagen hierfür wiederum den Einsatz von condylar positioning devices (CPD) vor (Yang und Hwang 2014b).

Das Versuchsdesign des vorliegenden Modellversuchs, erlaubt perspektivisch auch die Betrachtung des bony interface und der Kondylen in Bezug auf „clockwise“ und „counterclockwise“ Rotationen. Durch die digitale, dreidimensionale Einsichtnahme könnten die in der Studie von Yang und Hwang verwendete 2D Cephalometrie durch Fernröntgenseitenbilder (Yang und Hwang 2014b) anschaulich ergänzt werden.

Anzumerken ist, dass es weitere Bewegungen der Kondylen gibt, die nicht als direkte Folge der BSSO zu werten sind, sondern als Konsequenz einer intraoperativen Fehlpositionierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente. Bewegungen entlang der Vertikalachse (kraniokaudale Verlagerungsrichtung) spielen beim „central condylar sag“ (vergleiche 4.3.1) eine Rolle (Reyneke und Ferretti 2002). Dabei werden die Kondylen bei Adaptation und Fixierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente ungewollt zu weit kaudal in der Gelenkpfanne positioniert. Dies führt nach Öffnung der mandibulo-maxillären Fixation zu einer Rückbewegung der Kondylen nach kranial in die Gelenkpfanne. Die Folge davon ist eine Malokklusion mit Mittellinienverschiebung zur betroffenen Seite und offenem Biss auf der betroffenen Seite (bei unilateralem „central condylar sag“) oder einem nach anterior offenen Biss und vergrößertem Overjet (bei bilateralen „central condylar sag“) (Reyneke und Ferretti 2002).

Bei dem Versuch diesen „condylar sag“ zu vermeiden, ging man sogar so weit, den Patienten intraoperativ und noch intubiert aufwachen zu lassen, um die Okklusion und Kondylenbewegungen zu testen (Politi et al. 2007). Nach Lösung der mandibulo-maxillären Fixation wurde der Patient erweckt und dazu aufgefordert verschiedene

Bewegungen des Unterkiefers durchzuführen, um die Okklusion zu bewerten. Nach erneuter Vertiefung der Narkose konnten dann gegebenenfalls Korrekturen der Segmentpositionen durchgeführt werden (Politi et al. 2007).

4.4 Kontext und Ausblick

Noch bestehen große Unterschiede zwischen einer virtuell geplanten und real durchführbaren bilateralen sagittalen Spaltungsosteotomie. Die detaillierte und präzise präoperative Planung lässt sich noch nicht mit ausreichender Genauigkeit in den Operationssitus übertragen. Das bony interface während des operativen Eingriffs weicht von den Vereinfachungen der digitalen Planung ab, sodass Bohrschablonen und PSIs für den standardmäßigen Einsatz nicht zuverlässig genug passen. Grund dafür sind unvorhersehbare Inkongruenzen in der Geometrie zwischen den lateralen gelenktragenden Ramussegmente und dem medialen Segment (Suojanen et al. 2017).

Es wird nach wie vor kontrovers diskutiert, ob und wie weit der Einsatz von Apparaturen oder Techniken zur Gelenkpositionierung bei der operativen Korrektur von knöchernen und/oder okklusalen Missverhältnissen des Unterkiefers notwendig ist, um Rezidiven und craniomandibulären Dysfunktionen zu vermeiden. Es herrscht jedoch weitestgehend Konsens darüber, dass es zum Erreichen von stabilen okklusalen, skelettalen und kondylären Verhältnissen vorteilhaft ist, die präoperative Position der Kondylen in der Fossa aufrecht zu erhalten (Will et al. 1984, Leonard 1985, Kim et al. 2009, Xi et al. 2015a, Nova et al. 2017).

Während viele Schritte im präoperativen Workflow genauestens digital planbar und operativ mit hoher Genauigkeit umsetzbar sind (Farrell et al. 2014, Heufelder et al. 2017), ist die Anlagerung und Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente an das mediale Segment bei der BSSO technisch noch unvollkommen.

Nicht nur die Gelenkpositionierung, sondern auch die letztendliche Fixierung der Segmente mittels Osteosynthese, ist nach wie vor Gegenstand von Diskussionen (Mavili et al. 2009, Roh et al. 2014, Lee et al. 2017). Neueste Untersuchungen von Lee et al. stellen zwei verschiedene Osteosyntheseplatten gegenüber (Lee et al. 2017). Auch wenn die von Lee et al. verwendeten „sliding plates“ keinen signifikanten Unterschied zu konventionellen geraden Vierlochplatten mit intermediärem Steg zeigen, wird dennoch deutlich, dass auch die Suche nach bestmöglicher Osteosynthese seit Beginn der orthognathen Chirurgie nicht ruht.

Die Wahl der Osteosynthese ist von großer Bedeutung, da sie entscheidend die Flexibilität und Adaptationsfähigkeit der Kondylen beeinflusst. Han und Hwang 2015

untersuchten in einer klinischen Studie an 25 Patienten, die eine Unterkieferrückverlagerung durch BSSO erhielten, computertomographisch die postoperative spontane Readjustierung der Kondylen nach perioperativer Positionsveränderung der Kondylen bei unterschiedlichen Osteosynthesetechniken (Han und Hwang 2015). Die CT Bildgebung erfolgte präoperativ, direkt postoperativ, nach 3 und nach 6 Monaten.

Die Adaptationsfähigkeit der Kondylen nach lateraler Auslenkung durch BSSO nahm dabei bei größer werdender Rigidität der Osteosynthese ab. Mikrobewegungen der Segmente bei semi-rigider Fixation durch eine Miniplatte mit 4 monokortikalen Schrauben erlaubten den Kondylen im Vergleich zur rigiden Fixation durch eine bikortikale Stellschraubenosteosynthese eine bessere spontane Readjustierung der verschobenen Kondylen in die präoperative Fossaposition.

4.4.1 Ausgleichsmöglichkeiten

Um den oben diskutierten Problemen im bony interface zu begegnen, kommen verschiedene Ausgleichsmöglichkeiten in Frage.

Die „short lingual split osteotomy“ (SLSO) nach Hunsuck, bei der die linguale Spaltung des Ramus in Horizontalrichtung kürzer durchgeführt wird, als bei der konventionellen Technik, verringert die Problematik bei Verlagerungen der Unterkieferspange deutlich, weil sich der Interramusabstand verkleinert. Die Hinterränder des medialen Segments drücken die lateralen gelenktragenden Ramussegmente weniger nach außen (Reduktion des „Schneepflugeffektes“) und es entsteht weniger „condylar torque“ (Hunsuck 1968, Böckmann et al. 2014). Auch die „intraorale vertikale Ramusosteotomie“ (IVRO) ist in diesem Kontext zu erwähnen (Caldwell und Letterman 1954, Robinson 1958). Vor allem bei asymmetrischen Dysgnathien zeigen diese Techniken eine deutliche Reduktion der Knocheninterferenzen, im Vergleich zur BSSO (Yang et al. 2010). Bei der SLSO und IVRO, die oft bei sehr schmal dimensionierten aufsteigenden Unterkieferästen favorisiert werden, besteht allerdings das Risiko, dass die Anlagerungsflächen zwischen den Segmenten mit zunehmender Vorverlagerungsstrecke verloren gehen und keine ausreichende Stabilitätsverhältnisse mehr herzustellen sind.

Weitere Möglichkeiten, neben der SLSO, sind Einschleifmaßnahmen im bony interface oder zusätzliche Osteotomien. Da zumeist die dorsolateralen Segmentflächen der Unterkieferspange mit den Medialflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente kollidieren, sind Einschleifmaßnahmen in diesen Bereichen gängige Techniken (Ellis 2007, Yang und Hwang 2014a).

In ausgeprägten Situationen können zusätzliche vertikale Osteotomien der dorsolateralen Segmentflächen der Unterkieferspange Abhilfe schaffen (Kim et al. 2002, Ellis 2007, Yang und Hwang 2014a).

Kim et al. beschrieben eine Technik, bei der eine Osteotomie des hintersten Teils der dorsolateralen Segmentflächen der Unterkieferspange vorgenommen wird (Kim et al. 2002).

Ellis entwickelte eine Technik, bei der eine zusätzliche linguale, vertikale Osteotomie dorsal des zweiten Molaren mittels einer Fräse oder Säge durchgeführt wird. Die entstehenden posterioren Segmente werden nach lingual gekippt um die Knocheninterferenzen auszugleichen und dort lose, das heißt ohne weitere Fixation, belassen (Ellis 2007) (Abbildung 4.1).

Eine Modifikation dieser Technik ist die seit kurzem diskutierte „posterior bending osteotomy“ (PBO) nach Yang und Hwang (Yang und Hwang 2014a) (Abbildung 4.2). Bei dieser Technik wird die linguale vertikale Zusatzosteotomie in Piezoosteotomietechnik durchgeführt und das entstehende zusätzliche posteriore Segment mit einer Positionierungsschraube am lateralen gelenktragenden Ramussegment fixiert.

Studien zu den jeweiligen Techniken konnten Einschränkungen der Stabilität, die wegen der zusätzlichen Segmentierung zu diskutieren sind, bisher nicht belegen (Kim et al. 2002, Yang und Hwang 2014c).

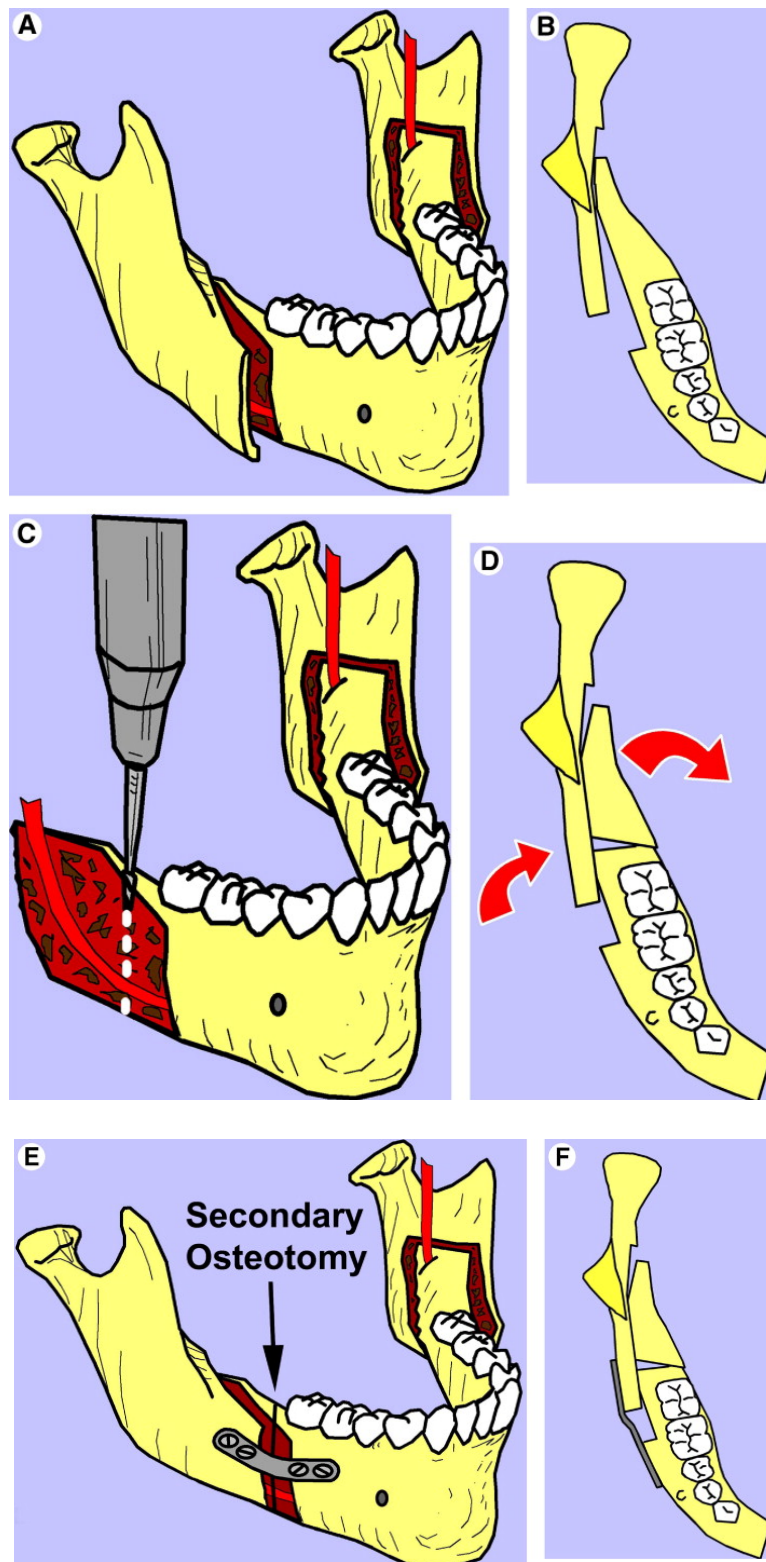


Abbildung 4.1: Die linguale Zusatzostotomie nach Ellis (aus (Ellis 2007)): Kollision der Segmente bei BSSO nach Vorverlagerung der Unterkieferspange. Ansicht seitlich (A) und von oben (B). Durchführung der zusätzlichen Osteotomie am medialen Segment (C) und setzen einer Grünholzfraktur (D). Ansicht nach Einbringen des Osteosynthesematerials von der Seite (E) und von oben (F).

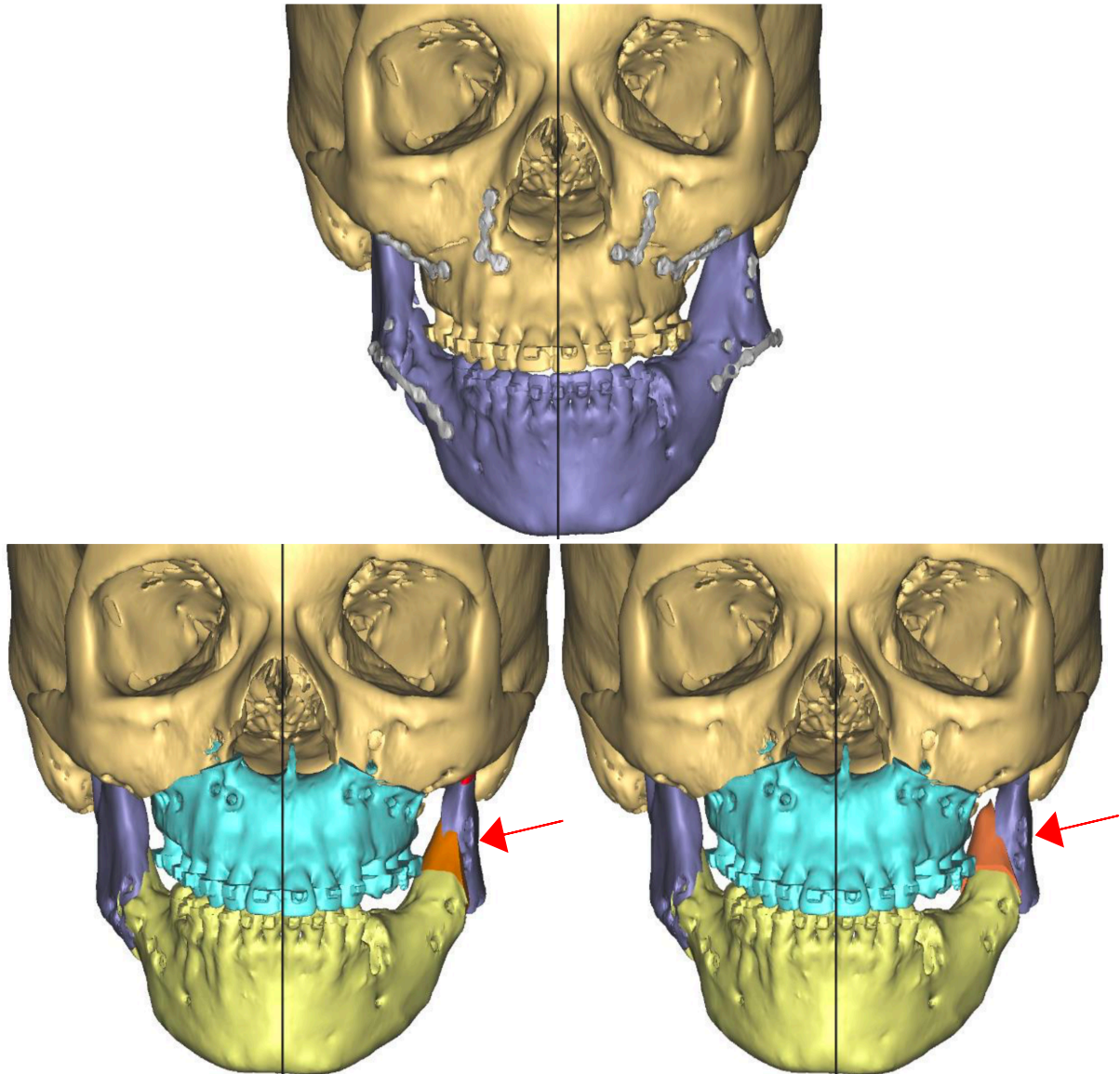


Abbildung 4.2: Die „posterior bending osteotomy“ nach (Yang und Hwang 2014a) im Rahmen einer Reoperation anhand eines virtuellen 3D-Modells (aus Sammlung Prof. Cornelius). Dargestellt sind die bei einer bignathen Reosteotomie mit BSSO entstehenden Segmente: Der Oberkiefer (türkis), das mediale Segment (gelb), die lateralen gelenktragenden Ramussegmente (lila) und das durch die zusätzliche vertikale Osteotomie entstandene posteriore Segment (orange). Oben: Präoperative Ausgangssituation (Malokklusion, Fehlstellung und Deformationen nach vorangegangener bignather Umstellungsosteotomie, Osteosynthesematerial noch in situ). Unten links: Nach Reosteotomien und Verlagerung des Ober- und Unterkiefers kollidiert die linke dorsolaterale Fläche des medialen Segments mit der Medialfläche des gelenktragenden Ramussegments links. In der Planungssoftware sind diese beiden Segmente überlagert („Kollision“) dargestellt. Unten rechts: Das zusätzliche „posterior bending“ Segment nach vertikaler Zusatzosteotomie wird nach lingual gekippt, um die Knocheninterferenz auszugleichen.

Vor allem bei Rückverlagerungen können auch Knocheninterpositionen, beispielsweise mit dem Knochenresektat aus der Außenkortikalis, angebracht sein, um die entstandene quaderähnliche, parallelwandige Knochenlücke zu füllen und somit einen übermäßigen „Medialshift“ der Kondylen zu vermeiden (Kang et al.

2010). Alternativ können Knochenlücken auch mit speziell gebogenen Platten offen gehalten werden (Ueki et al. 2008). Es muss jedoch offenbleiben, bis zu welcher Breite der Knochenlücken letztere Technik anwendbar ist.

4.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Pilotstudie sind nicht unerwartet, die genauen Vorgänge im bony interface wurden jedoch in dieser Form bisher noch nicht visualisiert.

Im Verlauf dieser Arbeit stellte sich heraus, dass die Geometrie des bony interface in Abhängigkeit von der Verlagerungsrichtung nach anterior oder posterior gewissen Mustern folgt, deren Ausprägung von der Translationsstrecke abhängig ist. Allerdings werden diese wiederkehrenden Muster stark von vielen weiteren Faktoren beeinflusst, allen voran der für jeden Patienten individuellen Anatomie der Mandibula, der Art und dem Ausprägungsgrad der Dysgnathie und der Positionierung des mandibulo-maxillären Blocks in allen Freiheitsgraden. Die sich in der Chirurgie rasant entwickelnden neuen Technologien haben jedoch auch ein bisher unausgeschöpftes großes Potenzial. Durch die Entwicklung statistischer 3D Modelle der Mandibula, könnten in Zukunft ausgewählte Faktoren in Clustern gruppiert werden, um die interindividuelle Variabilität auszugleichen und die Vorhersagen zu optimieren (Metzger et al. 2011, Kim et al. 2012, Raith et al. 2017). Dabei wäre es wünschenswert, mehr über die Toleranzbereiche der Kiefergelenkpositionierung bei der BSSO in Erfahrung zu bringen, bei deren Einhaltung die BSSO noch besser vorhersagbare Langzeitergebnisse hinsichtlich Stabilität und Beschwerdefreiheit liefern kann.

Trotz der kontinuierlichen Fortschritte der virtuellen Planungsoptionen in der orthognathen Chirurgie, bestehen vor allem beim Transfer in den Operationssitus immer noch Defizite, insbesondere bei der Gestaltung der Ramusosteotomie nach Plan und in Realität, sowie der Anlagerung und Fixation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (Suojanen et al. 2017). Es ist zu erwarten, dass die noch vorhandene Problematik in der Zukunft nach und nach, beispielsweise durch Individualisierung der Osteotomie mithilfe von Lasertechniken und/oder Robotik Verfahren (Juergens et al. 2017), abgestellt werden kann, sodass sich der Paradigmenshift (Bell 2011) in der orthognathen Chirurgie weiter vervollkommnet. Dem Verhalten des bony interface mit allen Konsequenzen für die Positionierung der Kiefergelenke ist dabei ein entscheidender Stellenwert zuzumessen.

Hoffentlich kann die hier vorgestellte erste Visualisierung dabei helfen, die Zusammenhänge zwischen bony interface und Gelenkstellung in Zukunft weiter zu detaillieren und im individuellen Patientenfall nutzbringend anzuwenden.

5. Zusammenfassung

Nach bilateralen sagittalen Spaltungsosteotomien (BSSO) im Kieferwinkel- und Ramusbereich kann es bei korrekativer Umstellung (Vor- oder Rückverlagerung) des Unterkiefers zu Knocheninterferenzen und Lückenbildung durch Kollisionen der dorsolateralen Segmentflächen des medialen Segments mit den Medialflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente kommen.

In der Literatur besteht nach wie vor keine Einigkeit darüber, wie die Positionierung der Kondylen durchzuführen ist und zu welchem Ausmaß Änderungen der Kondylenposition durch Umstellungsosteotomien zu postoperativen Komplikationen wie Resorptionen, Rezidiven und craniomandibulären Dysfunktionen führen können.

Die Zusammenhänge der Geometrie im Osteotomiespalt mit der Kondylenposition sind kaum systematisch untersucht, da bildgebende Verfahren dazu bisher nicht in der Lage waren. Fortschritte in der digitalen Technologie und virtuelle Planungsverfahren erlauben jetzt eine dreidimensionale Einsichtnahme in die Vorgänge des bony interface.

In dieser Modellstudie wurde das Verhalten des bony interface nach anteriorer oder posteriorer Translation an Stereolithographiemodellen im Artikulator visualisiert und bewertet. Hierfür wurden Computertomographie basierte STL-Modelle von 6 Patienten mit Retro- oder Prognathien in den 3D Orthognathic Surgery Simulator (3D-OSS) nach Krenkel und Lixl eingebaut und Translationsbewegungen des medialen Segments in Sagittalrichtung (z-Achse) durchgeführt. Dies ermöglichte die direkte Veranschaulichung der Kollisionen und Lückenbildung zwischen den Segmenten.

Anschließend erfolgte eine virtuelle Darstellung und computergestützte Bestimmung und Vermessung dieser Kollisionsbereiche beziehungsweise der Lückenbildung im bony interface anhand von CT- Untersuchungsreihen der STL-Modelle in einem selbst entwickelten metallfreien Simulator. Darüber hinaus wurde eine Analyse der Veränderung der Kondylenposition vor und nach kompletter Freigabe der Kondylen und Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente durchgeführt.

Die gewonnenen digitalen Datensätze wurden in entsprechender Software bearbeitet und ausgewertet.

Die Untersuchungen kamen zu folgendem Ergebnis: Mit Zunahme der sagittalen Verlagerungstrecken zeichneten sich im 3DOSS- und CT-Modellversuch zwei Grundformen des bony interface ab.

Progrediente Vorverlagerungen resultierten in einer rautenähnlichen Konfiguration mit steigendem Öffnungswinkel nach vorn, da der hintere Rand des medialen Segments an die Innenflächen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente stieß. Dadurch kam es zu einer Rotation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente um die Vertikalachse („yaw“) nach außen (sogenannter „condylar torque“) und um die Sagittalachse („roll“) nach innen. Im Modellversuch bildeten sich Lücken im anterioren Bereich des Osteotomiespalts mit Breiten bis zu 6,2 mm und Öffnungswinkeln von bis zu 7°.

Rückverlagerungen resultierten in Knochenlücken mit einer flachen quaderähnlichen Form mit parallelen Seitenwänden, ohne Kollisionen zwischen den Segmenten.

Die Knochenlückenbreiten waren bei Rückverlagerungen mit Breiten bis zu 3,4 mm generell kleiner als bei Vorverlagerungen.

Die Modellversuche belegen, dass größer werdende Interferenzen und Abstände zwischen den Segmenten eine Gelenkpositionierung durch passive Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente schwieriger machen und das Risiko gravierender Veränderungen der Kondylenposition steigt.

Die Differenz des Interkondylarwinkel zwischen Ausgangswinkel und Winkel nach Vorverlagerung (ohne Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente) ergab Werte bis 13,7° („condylar torque“). Eine Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente führte bei Vorverlagerungen durch eine Kippung über einen punkt- oder linienförmigen Kollisionsbereich am dorsokraniellen Rand der Anlagerungsfläche der Segmente zu einem „Lateralshift“ der Kondylen und einer Rotation um die Sagittalachse nach außen. Die seitliche Auslenkung der Kondylen war von Vergrößerungen der Interkondylardistanz bis zu 5,3 mm gefolgt.

Bei Rückverlagerung kam es durch die entstandenen Knochenlücken bei der Adaptation der lateralen gelenktragenden Ramussegmente zu einem „Medialshift“ der Kondylen. Im Modellversuch wurden Verkleinerungen der Interkondylardistanzen von bis zu maximal 3,5 mm beobachtet. Der Interkondylarwinkel wurde im Modellversuch bei Rückverlagerungen nicht beeinflusst.

Um dieses Verhalten im bony interface auszugleichen und somit eine möglichst unveränderte Kondylenposition zu erreichen kommen verschiedene Möglichkeiten in Frage: Bei Vorverlagerungen sind linguale Zusatzosteotomien und ihre Modifikationen effektiv (Kim et al. 2002, Ellis 2007, Yang und Hwang 2014a). Bei Rückverlagerungen sind vor allem Knocheninterpositionen in den Osteotomiespalt, beispielsweise mit dem Resektat aus der Außenkortikalis angebracht, um einem übermäßigen „Medialshift“ des Ramus entgegen zu wirken.

Auch modellierende Osteotomien im bony interface und Modifikationen der Operationstechnik wie die „short lingual split osteotomy“ nach Hunsuck können in Betracht kommen, um Knochenkollisionen zu minimieren.

Daneben muss der Nutzen neuer Techniken zur Positionierung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente wie die Segment- beziehungsweise Gelenkeinstellung mit innovativen condylar positioning devices (CPD), beispielsweise 3D gedruckten Gerüsten oder intraoperativer Navigation, zukünftig weiter evaluiert werden.

6. Literaturverzeichnis

Abdel-Moniem Barakat, A., Abou-ElFetouh, A., Hakam, M. M., El-Hawary, H., Abdel-Ghany, K. M. (2014). "Clinical and radiographic evaluation of a computer-generated guiding device in bilateral sagittal split osteotomies." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(5): e195-203.

Al-Moraissi, E. A., Wolford, L. M., Perez, D., Laskin, D. M., Ellis, E. (2017). "Does Orthognathic Surgery Cause or Cure Temporomandibular Disorders? A Systematic Review and Meta-Analysis." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **75**(9): 1835-1847.

Alder, M. E., Deahl, S. T., Matteson, S. R., Van Sickels, J. E., Tiner, B. D., Rugh, J. D. (1999). "Short-term changes of condylar position after sagittal split osteotomy for mandibular advancement." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **87**(2): 159-165.

Angle, A. D., Rebollato, J., Sheats, R. D. (2007). "Transverse displacement of the proximal segment after bilateral sagittal split osteotomy advancement and its effect on relapse." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **65**(1): 50-59.

Axhausen, G. (1934). "Zur Behandlung veralteter disloziert geheilter Oberkieferbrüche." Deutsche Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde mit Zentralblatt für die gesamte Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde **1**: 334-339.

Ballin, M. (1908). "Double resection for the treatment of mandibular protrusion." Items of Interest **30**: 422.

Bell, R. B. (2011). "Computer planning and intraoperative navigation in orthognathic surgery." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **69**(3): 592-605.

Berger, M., Nova, I., Kallus, S., Ristow, O., Eisenmann, U., Dickhaus, H., Engel, M., Freudlsperger, C., Hoffmann, J., Seeberger, R. (2018). "Electromagnetic navigated condylar positioning after high oblique sagittal split osteotomy of the mandible: a guided method to attain pristine temporomandibular joint conditions." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology **125**(5): 407-414.e401.

Berger, P. (1897). Du traitement chirurgical du prognathisme Med. Thèse.Lyon

Bethge, L. S., Ballon, A., Mack, M., Landes, C. (2015). "Intraoperative condyle positioning by sonographic monitoring in orthognathic surgery verified by MRI." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **43**(1): 71-80.

Bettega, G., Cinquin, P., Lebeau, J., Raphaël, B. (2002). "Computer-assisted orthognathic surgery: Clinical evaluation of a mandibular condyle repositioning system." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **60**(1): 27-34.

- Bettega, G., Dessenne, V., Raphael, B., Cinquin, P. (1996). "Computer-assisted mandibular condyle positioning in orthognathic surgery." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **54**(5): 553-558.
- Blair, V. (1906). "Report of a case of double resection for the correction of protrusion of the mandible." Dental Cosmos **48**: 817.
- Böckmann, R., Meyns, J., Dik, E., Kessler, P. (2014). "The modifications of the sagittal ramus split osteotomy: A literature review." Plastic and Reconstructive Surgery Global Open **2**(12).
- Caldwell, J. B., Letterman, G. S. (1954). "Vertical osteotomy in the mandibular ramal for correction of prognathism." Journal of Oral Surgery **12**(3): 185-202.
- Cevidanes, L. H. S., Bailey, L. T. J., Tucker, S. F., Styner, M. A., Mol, A., Phillips, C. L., Proffit, W. R., Turvey, T. (2007). "Three-dimensional cone-beam computed tomography for assessment of mandibular changes after orthognathic surgery." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **131**(1): 44-50.
- Chen, S., Lei, J., Wang, X., Fu, K.-y., Farzad, P., Yi, B. (2013). "Short- and long-term changes of condylar position after bilateral sagittal split ramus osteotomy for mandibular advancement in combination with Le Fort I osteotomy evaluated by cone-beam computed tomography." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **71**(11): 1956-1966.
- Cohn-Stock, G. (1921). "Die chirurgische Immediatregulierung der Kiefer, speziell die chirurgische Behandlung der Prognathie." Vierteljahrsschrift für Zahnheilkunde **37**: 320-354.
- Costa, F., Robiony, M., Toro, C., Sembronio, S., Polini, F., Politi, M. (2008). "Condylar positioning devices for orthognathic surgery: A literature review." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **106**(2): 179-190.
- Costas, A., Sanromán, J. F., Castro, P., Ferro, M. F., Lopez, A., Stavaru, B. (2018). "Study of condylar positional changes after sagittal split osteotomy for mandibular advancement: A prospective cohort study." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **46**(7): 1079-1090.
- Csaszar, G., Bröker-Csaszar, B. (2000). "Die Realisierung bimaxillärer Operationsplanungen mit dem 3-D-Oss." Informationen aus Orthodontie & Kieferorthopädie **33**(04): 343-352.
- Cutbirth, M., Van Sickels, J. E., Thrash, W. J. (1998). "Condylar resorption after bicortical screw fixation of mandibular advancement." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **56**(2): 178-182.
- Dal Pont, G. (1961). "Retromolar osteotomy for the correction of prognathism." Journal of Oral Surgery **19**: 42-47.
- Draenert, F. G., Erbe, C., Zenglein, V., Kämmerer, P. W., Wriedt, S., Al Nawas, B. (2010). "3D analysis of condylar position after sagittal split osteotomy of the mandible

in mono- and bimaxillary orthognathic surgery – a methodology study in 18 patients." Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie **71**(6): 421-429.

Ellis, E. (1990). "Accuracy of model surgery: Evaluation of an old technique and introduction of a new one." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **48**(11): 1161-1167.

Ellis, E. (1994). "Condylar positioning devices for orthognathic surgery: Are they necessary?" Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **52**(6): 536-552; discussion 552-534.

Ellis, E. (2007). "A method to passively align the sagittal ramus osteotomy segments." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **65**(10): 2125-2130.

Ellis, E., Johnson, D. G., Hayward, J. R. (1984). "Use of the orthognathic surgery simulating instrument in the presurgical evaluation of facial asymmetry." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **42**(12): 805-811.

Epker, B. N., Wylie, G. A. (1986). "Control of the condylar-proximal mandibular segments after sagittal split osteotomies to advance the mandible." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology **62**(6): 613-617.

Farrell, B. B., Franco, P. B., Tucker, M. R. (2014). "Virtual surgical planning in orthognathic surgery." Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America **26**(4): 459-473.

Freihofer, H. P. M., Petrešević, D. (1975). "Late results after advancing the mandible by sagittal splitting of the rami." Journal of Maxillofacial Surgery **3**: 250-257.

Gateno, J., Teichgraeber, J. F., Xia, J. J. (2003). "Three-dimensional surgical planning for maxillary and midface distraction osteogenesis." Journal of Craniofacial Surgery **14**(6): 833-839.

Gateno, J., Xia, J. J., Teichgraeber, J. F., Christensen, A. M., Lemoine, J. J., Liebschner, M. A., Gliddon, M. J., Briggs, M. E. (2007). "Clinical feasibility of computer-aided surgical simulation (CASS) in the treatment of complex cranio-maxillofacial deformities." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **65**(4): 728-734.

Gerressen, M., Zadeh, M. D., Stockbrink, G., Riediger, D., Ghassemi, A. (2006). "The functional long-term results after bilateral sagittal split osteotomy (BSSO) with and without a condylar positioning device." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **64**(11): 1624-1630.

Hackney, F. L., Van Sickels, J. E., Nummikoski, P. V. (1989). "Condylar displacement and temporomandibular joint dysfunction following bilateral sagittal split osteotomy and rigid fixation." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **47**(3): 223-227.

Han, J. J., Hwang, S. J. (2015). "Three-dimensional analysis of postoperative returning movement of perioperative condylar displacement after bilateral sagittal split ramus osteotomy for mandibular setback with different fixation methods." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **43**(9): 1918-1925.

- Han, J. J., Yang, H. J., Lee, S.-J., Hwang, S. J. (2014). "Relapse after SSRO for mandibular setback movement in relation to the amount of mandibular setback and intraoperative clockwise rotation of the proximal segment." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(6): 811-815.
- Harris, M. D., Van Sickels, J. R., Alder, M. (1999). "Factors influencing condylar position after the bilateral sagittal split osteotomy fixed with bicortical screws." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **57**(6): 650-654.
- Helm, G., Stepke, M. T. (1997). "Maintenance of the preoperative condyle position in orthognathic surgery." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **25**(1): 34-38.
- Heufelder, M., Wilde, F., Pietzka, S., Mascha, F., Winter, K., Schramm, A., Rana, M. (2017). "Clinical accuracy of waferless maxillary positioning using customized surgical guides and patient specific osteosynthesis in bimaxillary orthognathic surgery." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **45**(9): 1578-1585.
- Hiatt, W., Schelkun, P. M., Moore, D. L. (1988). "Condylar positioning in orthognathic surgery." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **46**(12): 1110-1112.
- Hoppenreijts, T. J. M., Freihofer, H. P. M., Stoelinga, P. J. W., Tuinzing, D. B., van't Hof, M. A. (1998). "Condylar remodelling and resorption after Le Fort I and bimaxillary osteotomies in patients with anterior open bite: A clinical and radiological study aesthetic and reconstructive surgery." International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **27**(2): 81-91.
- Hullihen, S. P. (1849). "Case of elongation of the under jaw and distortion of the face and neck, caused by a burn, successfully treated." The American Journal of Dental Science **9**: 157-165.
- Hunsuck, E. (1968). "A modified intraoral sagittal splitting technic for correction of mandibular prognathism." Journal of Oral Surgery **26**(4): 250-253.
- Hwang, D.-S., Kim, Y.-I., Lee, K.-M. (2014). "Effect of intended manual condylar positioning on skeletal and dental changes in skeletal Class III deformities: CBCT-generated half-cephalograms." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(1): 7-12.
- Hwang, H.-S., Jiang, T., Sun, L., Lee, K.-M., Oh, M.-H., Biao, Y., Oh, H.-K., Bechtold, T. E. (2019). "Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **47**(3): 406-413.
- Hwang, S.-J., Haers, P. E., Seifert, B., Sailer, H. F. (2004). "Non-surgical risk factors for condylar resorption after orthognathic surgery." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **32**(2): 103-111.
- Hwang, S.-J., Haers, P. E., Zimmermann, A., Oechslin, C., Seifert, B., Sailer, H. F. (2000). "Surgical risk factors for condylar resorption after orthognathic surgery." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **89**(5): 542-552.

Jaboulay, M., Berard, L. (1898). "Traitement chirurgical du prognathisme inferieur." Presse médicale **6**: 173-176.

Jaisinghani, S., Adams, N. S., Mann, R. J., Polley, J. W., Giroto, J. A. (2017). "Virtual surgical planning in orthognathic surgery." Eplasty **17**.

Joos, U. (1999). "An adjustable bone fixation system for sagittal split ramus osteotomy: preliminary report." British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **37**(2): 99-103.

Juergens, P., Augello, M., Baek, K., Deibel, W., Baetscher, C., Segesser, M., Cattin, P., Zeilhofer, H. F. (2017). "Execution of midfacial osteotomies with a cold ablation robot-guided laser osteotome." International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **46**: 205.

Kang, M. G., Yun, K. I., Kim, C. H., Park, J.-U. (2010). "Postoperative condylar position by sagittal split ramus osteotomy with and without bone graft." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **68**(9): 2058-2064.

Katsumata, A., Nojiri, M., Fujishita, M., Arijii, Y., Arijii, E., Langlais, R. P. (2006). "Condylar head remodeling following mandibular setback osteotomy for prognathism: A comparative study of different imaging modalities." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **101**(4): 505-514.

Kerstens, H. C. J., Tuinzing, D. B., Golding, R. P., van der Kwast, W. A. M. (1990). "Condylar atrophy and osteoarthritis after bimaxillary surgery." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology **69**(3): 274-280.

Kessler, P., Wiltfang, J., Teschner, M., Girod, B., Neukam, F. (2000). "Computergraphische Simulationsmöglichkeiten in der orthopädischen Chirurgie." Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie **4**(6): 373-376.

Kim, C.-H., Lee, J.-H., Cho, J.-Y., Lee, J.-H., Kim, K.-W. (2007). "Skeletal stability after simultaneous mandibular angle resection and sagittal split ramus osteotomy for correction of mandible prognathism." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **65**(2): 192-197.

Kim, D.-S., Woo, S.-Y., Yang, H. J., Huh, K.-H., Lee, S.-S., Heo, M.-S., Choi, S.-C., Hwang, S. J., Yi, W.-J. (2014a). "An integrated orthognathic surgery system for virtual planning and image-guided transfer without intermediate splint." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(8): 2010-2017.

Kim, H.-M., Baek, S.-H., Kim, T.-Y., Choi, J.-Y. (2014b). "Evaluation of three-dimensional position change of the condylar head after orthognathic surgery using computer-aided design/computer-aided manufacturing-made condyle positioning jig." Journal of Craniofacial Surgery **25**(6): 2002-2007.

Kim, M.-J., Kim, S.-G., Park, Y.-W. (2002). "Positional stability following intentional posterior ostectomy of the distal segment in bilateral sagittal split ramus osteotomy for correction of mandibular prognathism." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **30**(1): 35-40.

- Kim, S.-G., Yi, W.-J., Hwang, S.-J., Choi, S.-C., Lee, S.-S., Heo, M.-S., Huh, K.-H., Kim, T.-I., Hong, H., Yoo, J. H. (2012). "Development of 3D statistical mandible models for cephalometric measurements." Imaging Science in Dentistry **42**(3): 175-182.
- Kim, Y.-K., Yun, P.-Y., Ahn, J.-Y., Kim, J.-W., Kim, S.-G. (2009). "Changes in the temporomandibular joint disc position after orthognathic surgery." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **108**(1): 15-21.
- Komori, E., Aigase, K., Sugisaki, M., Tanabe, H. (1989). "Cause of early skeletal relapse after mandibular setback." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **95**(1): 29-36.
- Krenkel, C., Lixl, G. (1991). "Ein Modelloperationsgerät zur Planung und Simulation von OK-und UK-Osteotomien." Zahnärztliche Praxis **42**(12): 471-473.
- Kuehle, R., Berger, M., Saure, D., Hoffmann, J., Seeberger, R. (2016). "High oblique sagittal split osteotomy of the mandible: Assessment of the positions of the mandibular condyles after orthognathic surgery based on cone-beam tomography." British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **54**(6): 638-642.
- Kundert, M., Hadjianghelou, O. (1980). "Condylar displacement after sagittal splitting of the mandibular rami: A short-term radiographic study." Journal of Maxillofacial Surgery **8**: 278-287.
- Landes, C. A. (2004). "Proximal segment positioning in bilateral sagittal split osteotomy: Intraoperative dynamic positioning and monitoring by sonography." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **62**(1): 22-28.
- Landes, C. A., Sterz, M. (2003). "Evaluation of condylar translation by sonography versus axiography in orthognathic surgery patients." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **61**(12): 1410-1417.
- Lee, H. G., Agpoon, K. J., Besana, A. N., Lim, H. K., Jang, H. S., Lee, E. S. (2017). "Mandibular stability using sliding or conventional four-hole plates for fixation after bilateral sagittal split ramus osteotomy for mandibular setback." British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **55**(4): 378-382.
- Lee, W., Park, J. U. (2002). "Three-dimensional evaluation of positional change of the condyle after mandibular setback by means of bilateral sagittal split ramus osteotomy." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **94**(3): 305-309.
- Leonard, M. (1976). "Preventing rotation of the proximal fragment in the sagittal ramus split operation." Journal of Oral Surgery **34**(10): 942-942.
- Leonard, M. S. (1985). "Maintenance of condylar position after sagittal split osteotomy of the mandible." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **43**(5): 391-392.
- Lindorf, H. H. (1977). "Chirurgische-schädelbezügliche Einstellung des Gebisses (Doppelsplintmethode)." Deutsche zahnärztliche Zeitschrift(32): 260-261.

- Lindorf, H. H. (1986). "Sagittal ramus osteotomy with tandem screw fixation: Technique and results." Journal of Maxillofacial Surgery **14**: 311-316.
- Luhr, H. (1985). Skelettverlagernde Operationen zur Harmonisierung des Gesichtsprofil—Probleme der stabilen Fixation von Osteotomiesegmenten. Die Ästhetik von Form und Funktion in der Plastischen und Wiederherstellungschirurgie, Springer: 87-92.
- Luhr, H. (1989). "The significance of condylar position using rigid fixation in orthognathic surgery." Clinics in Plastic Surgery **16**(1): 147-156.
- Luhr, H., Kubein-Meesenburg, D. (1989). "Rigid skeletal fixation in maxillary osteotomies. Intraoperative control of condylar position." Clinics in Plastic Surgery **16**(1): 157-163.
- Luhr, H., Kubein-Meesenburg, D., Schwestka-Polly, R. (1991). "Bedeutung und Technik der Kiefergelenkpositionierung bei der sagittalen Spaltung des Unterkiefers." Fortschritte der Kieferorthopädie **52**(2): 66-72.
- Luhr, H., Schauer, W., Jäger, A., Kubein-Meesenburg, D. (1986). "Formveränderung des Unterkiefers durch kieferorthopädisch-chirurgische Maßnahmen mit stabiler Fixation der Segmente." Fortschritte der Kieferorthopädie **47**(1): 39-47.
- Markiewicz, M. R., Bell, R. B. (2011). "Modern concepts in computer-assisted craniomaxillofacial reconstruction." Current Opinion in Otolaryngology and Head and Neck Surgery **19**(4): 295-301.
- Mast, G., Ehrenfeld, M. (2010). Chirurgische Kieferorthopädie. Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. N. Schwenzer und M. Ehrenfeld, Georg Thieme Verlag. **4. Auflage**: 242-244.
- Mavili, M. E., Canter, H. I., Saglam-Aydinatay, B. (2009). "Semirigid fixation of mandible and maxilla in orthognathic surgery: Stability and advantages." Annals of Plastic Surgery **63**(4): 396-403.
- Méndez-Manjón, I., Guijarro-Martínez, R., Valls-Ontañón, A., Hernández-Alfaro, F. (2016). "Early changes in condylar position after mandibular advancement: a three-dimensional analysis." International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **45**(6): 787-792.
- Merkx, M. A. W., Van Damme, P. A. (1994). "Condylar resorption after orthognathic surgery: Evaluation of treatment in 8 patients." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **22**(1): 53-58.
- Merten, H.-A., Halling, F. (1992). "A new condylar positioning technique in orthognathic surgery: Technical note." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **20**(7): 310-312.
- Metzger, M. C., Hohlweg-Majert, B., Schwarz, U., Teschner, M., Hammer, B., Schmelzeisen, R. (2008). "Manufacturing splints for orthognathic surgery using a three-dimensional printer." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **105**(2): e1-e7.

- Metzger, M. C., Vogel, M., Hohlweg-Majert, B., Mast, H., Fan, X., Rüdell, A., Schlager, S. (2011). "Anatomical shape analysis of the mandible in Caucasian and Chinese for the production of preformed mandible reconstruction plates." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **39**(6): 393-400.
- Miao, M. Z., Wang, B., Wu, D., Zhang, S., Wong, S., Shi, O., Hu, A., Mao, L., Fang, B. (2018). "Temporomandibular joint positional change accompanies post-surgical mandibular relapse - A long-term retrospective study among patients who underwent mandibular advancement." Orthodontics & Craniofacial research **21**(1): 33-40.
- Moore, K. E., Gooris, P. J. J., Stoelinga, P. J. W. (1991). "The contributing role of condylar resorption to skeletal relapse following mandibular advancement surgery: Report of five cases." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **49**(5): 448-460.
- Nova, I., Kallus, S., Berger, M., Ristow, O., Eisenmann, U., Freudlsperger, C., Hoffmann, J., Dickhaus, H. (2017). "Computer assisted positioning of the proximal segment after sagittal split osteotomy of the mandible: Preclinical investigation of a novel electromagnetic navigation system." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **45**(5): 748-754.
- Obwegeser, H. (1963). "The indications for surgical correction of mandibular deformity by the sagittal splitting technique." British Journal of Oral Surgery **1**: 157-171.
- Obwegeser, H., Trauner, R. (1955). "Zur Operationstechnik bei der Progenie und anderen Unterkieferanomalien." Deutsche Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde mit Zentralblatt für die gesamte Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde **23**(1): 1-26.
- Park, J.-C., Kim, U.-K., Hwang, D.-S. (2018). "Three-dimensional analysis of perioperative condylar displacement after mandibular setback surgery with intended manual condylar positioning." Journal of Craniofacial Surgery **29**(8): e767-e773.
- Pascal, E., Majoufre, C., Bondaz, M., Courtemanche, A., Berger, M., Bouletreau, P. (2018). "Current status of surgical planning and transfer methods in orthognathic surgery." Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery **119**(3): 245-248.
- Perthes, G. (1924). "Über Frakturen und Luxationsfrakturen des Kieferköpfchens und ihre operative Behandlung." Langenbecks Archiv für klinische Chirurgie, vereinigt mit Deutsche Zeitschrift für Chirurgie. **133**: 418-433.
- Pistner, H. (1999). Osteosynthese mit bioresorbierbaren Materialien: Entwicklung einer Schraube vom Werkstoff bis zur klinischen Anwendung. Med. Habilitationsschrift, Universität Würzburg, Einhorn-Press-Verlag.
- Pistner, H., Reuther, J. F., Ordnung, R., Bili, J., Voges, I. (1997). "Osteosynthese nach sagittaler Spaltung des Unterkiefers." Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie **1**(1-6): 199-204.
- Politi, M., Toro, C., Costa, F., Polini, F., Robiony, M. (2007). "Intraoperative awakening of the patient during orthognathic surgery: A method to prevent the condylar sag." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **65**(1): 109-114.

Polley, J. W., Figueroa, A. A. (2013). "Orthognathic positioning system: intraoperative system to transfer virtual surgical plan to operating field during orthognathic surgery." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **71**(5): 911-920.

Raith, S., Wolff, S., Steiner, T., Modabber, A., Weber, M., Hölzle, F., Fischer, H. (2017). "Planning of mandibular reconstructions based on statistical shape models." International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery **12**(1): 99-112.

Reuther, J. (2000). "Orthognathe Chirurgie: skelettverlagernde Operationen." Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie **4**(1): 237-248.

Reuther, J., Breuer, B., Spitz, P., Frenkel, G. (1981). "Veränderung der Gelenkfunktion durch Osteotomien im aufsteigenden Unterkieferast." Fortschritte der Kiefer- und Gesichtschirurgie **26**: 108-111.

Reyneke, J. P., Ferretti, C. (2002). "Intraoperative diagnosis of condylar sag after bilateral sagittal split ramus osteotomy." British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **40**(4): 285-292.

Robinson, M. (1958). "Prognathism corrected by open vertical subcondylotomy." Journal of Oral Surgery **16**(3): 215-219.

Robiony, M., Polini, F., Costa, F., Vercellotti, T., Politi, M. (2004). "Piezoelectric bone cutting in multipiece maxillary osteotomies." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **62**(6): 759-761.

Roh, Y.-C., Shin, S.-H., Kim, S.-S., Sandor, G. K., Kim, Y.-D. (2014). "Skeletal stability and condylar position related to fixation method following mandibular setback with bilateral sagittal split ramus osteotomy." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(8): 1958-1963.

Roser, M., Cornelius, C. P., Gehrke, G., Ehrenfeld, M., Mast, G. (2011). "Osteotomien im Gesichtsskelett – Basis der orthognathen Chirurgie: Befunderhebung, präoperative Planung und individuelle Realisation bei Korrekturoperationen von Kiefer- und Gesichtsdeformitäten." Op-Journal **27**(03): 200-221.

Rotskoff, K. S., Herbosa, E. G., Villa, P. (1991). "Maintenance of condyle-proximal segment position in orthognathic surgery." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **49**(1): 2-7.

Sahoo, N. K., Kaur, P., Roy, I. D., Sharma, R. (2017). "Complications of sagittal split ramus osteotomy." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology **29**(2): 100-104.

Saka, B., Petsch, I., Hingst, V., Härtel, J. (2004). "The influence of pre- and intraoperative positioning of the condyle in the centre of the articular fossa on the position of the disc in orthognathic surgery. A magnetic resonance study." British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **42**(2): 120-126.

Schramm, A., Gellrich, N.-C., Schmelzeisen, R. (2007). Navigational surgery of the facial skeleton, Springer Science & Business Media.

Schuchardt, K. (1954). "Die Chirurgie als Helferin der Kieferorthopädie." Fortschritte der Kieferorthopädie **15**(1): 1-25.

Seeberger, R., Thiele, O. C., Mertens, C., Hoffmann, J., Engel, M. (2013). "Proximal segment positioning with high oblique sagittal split osteotomy: indications and limits of intraoperative mobile cone-beam computerized tomography." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology **115**(6): 731-736.

Spiessl, B. (1974). "Osteosynthese bei sagittaler Osteotomie nach Obwegeser-Dal Pont." Fortschritte der Kiefer- und Gesichts-Chirurgie **18**: 145-148.

Spitzer, W., Rettinger, G., Sitzmann, F. (1984). "Computerized tomography examination for the detection of positional changes in the temporomandibular joint after ramus osteotomies with screw fixation." Journal of Maxillofacial Surgery **12**: 139-142.

Steenen, S. A., van Wijk, A. J., Becking, A. G. (2016). "Bad splits in bilateral sagittal split osteotomy: systematic review and meta-analysis of reported risk factors." International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **45**(8): 971-979.

Steinhäuser, E., Janson, I. M. (1988). Kieferorthopädische Chirurgie: eine interdisziplinäre Aufgabe. 1. Grundlagen zur Behandlungsplanung und Behandlungsdurchführung, Quintessenz.

Suojanen, J., Leikola, J., Stoor, P. (2017). "The use of patient-specific implants in orthognathic surgery: A series of 30 mandible sagittal split osteotomy patients." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **45**(6): 990-994.

Swennen, G. R., Mollemans, W., Schutyser, F. (2009). "Three-dimensional treatment planning of orthognathic surgery in the era of virtual imaging." Journal of Oral and Maxillofacial surgery **67**(10): 2080-2092.

Tuinzing, D., Swart, J. (1978). "Lageveränderungen des Caput mandibulae bei Verwendung von Zugschrauben nach sagittaler Osteotomie des Unterkiefers." Deutsche Zeitschrift für Mund-, Kiefer- und Gesichts-Chirurgie **2**: 94.

Ueki, K., Degerliyurt, K., Hashiba, Y., Marukawa, K., Nakagawa, K., Yamamoto, E. (2008). "Horizontal changes in the condylar head after sagittal split ramus osteotomy with bent plate fixation." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **106**(5): 656-661.

Ueki, K., Nakagawa, K., Takatsuka, S., Yamamoto, E. (2001). "Plate fixation after mandibular osteotomy." International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **30**(6): 490-496.

Waldhart, E., Krenkel, C. (1981). "Röntgenologische Kontrolle der Kieferköpfchenposition nach sagittaler Osteotomie des Unterkiefers." Fortschritte der Kiefer- und Gesichts-Chirurgie **26**: 101.

Westermarck, A., Zachow, S., Eppley, B. L. (2005). "Three-dimensional osteotomy planning in maxillofacial surgery including soft tissue prediction." Journal of Craniofacial Surgery **16**(1): 100-104.

- Will, L. A., Joondeph, D. R., Hohl, T. H., West, R. A. (1984). "Condylar position following mandibular advancement: its relationship to relapse." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **42**(9): 578-588.
- Xi, T., de Koning, M., Bergé, S., Hoppenreijns, T., Maal, T. (2015a). "The role of mandibular proximal segment rotations on skeletal relapse and condylar remodelling following bilateral sagittal split advancement osteotomies." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **43**(9): 1716-1722.
- Xi, T., Schreurs, R., van Loon, B., de Koning, M., Bergé, S., Hoppenreijns, T., Maal, T. (2015b). "3D analysis of condylar remodelling and skeletal relapse following bilateral sagittal split advancement osteotomies." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **43**(4): 462-468.
- Xi, T., van Luijn, R., Baan, F., Schreurs, R., de Koning, M., Bergé, S., Maal, T. (2017). "Three-dimensional analysis of condylar remodeling and skeletal relapse following bimaxillary surgery: A 2-year follow-up study." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **45**(8): 1311-1318.
- Xia, J. J., Gateno, J., Teichgraeber, J. F. (2009). "A new clinical protocol to evaluate cranio-maxillofacial deformity and to plan surgical correction." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **67**(10): 2093.
- Yang, H. J., Hwang, S. J. (2014a). "Change in condylar position in posterior bending osteotomy minimizing condylar torque in BSSRO for facial asymmetry." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(4): 325-332.
- Yang, H. J., Hwang, S. J. (2014b). "Contributing factors to intraoperative clockwise rotation of the proximal segment as a relapse factor after mandibular setback with sagittal split ramus osteotomy." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(4): e57-e63.
- Yang, H. J., Hwang, S. J. (2014c). "Evaluation of postoperative stability after BSSRO to correct facial asymmetry depending on the amount of bone contact between the proximal and distal segment." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **42**(5): e165-e170.
- Yang, H. J., Hwang, S. J. (2018). "Relapse related to pushing and rebounding action in maxillary anterior downgraft with mandibular setback surgery." Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery **46**(8): 1336-1342.
- Yang, H. J., Lee, W. J., Yi, W. J., Hwang, S. J. (2010). "Interferences between mandibular proximal and distal segments in orthognathic surgery for patients with asymmetric mandibular prognathism depending on different osteotomy techniques." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology **110**(1): 18-24.
- Yoshida, K., Rivera, R. S., Kaneko, M., Kurita, K. (2001). "Minimizing displacement of the proximal segment after bilateral sagittal split ramus osteotomy in asymmetric cases." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **59**(1): 15-18.

Zinser, M. J., Mischkowski, R. A., Sailer, H. F., Zöller, J. E. (2012). "Computer-assisted orthognathic surgery: Feasibility study using multiple CAD/CAM surgical splints." Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology **113**(5): 673-687.

Zinser, M. J., Sailer, H. F., Ritter, L., Braumann, B., Maegele, M., Zöller, J. E. (2013). "A paradigm shift in orthognathic surgery? A comparison of navigation, computer-aided designed/computer-aided manufactured splints, and "classic" intermaxillary splints to surgical transfer of virtual orthognathic planning." Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **71**(12): 2151.e2151-2121.

7. Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1.1: Varianten der sagittalen Spaltung im Unterkiefer (aus (Roser et al. 2011)): a) „schräge“ sagittale Spaltung nach Perthes (1924) (Perthes 1924) und Schuchardt (1954) (Schuchardt 1954); b) sagittale Spaltung nach Obwegeser; c) Modifikation nach Dal-Pont (1961); d) „short lingual split osteotomy“ nach Hunsuck8
- Abbildung 1.2: Modelloperation im Artikulator an Gipsmodellen (aus (Roser et al. 2011)): Durch die Markierungen an den Gipssockeln lassen sich die Beträge der geplanten Verlagerungen ablesen. In diesem Fall soll eine Vorverlagerung des Unterkiefers um 7 mm links und 6 mm rechts sowie eine Kaudalverlagerung um 5 mm und eine Seitwärtsverlagerung um 2 mm nach rechts erfolgen.16
- Abbildung 1.3: Der 3D Orthognathic Surgery Simulator (3D-OSS) nach Krenkel und Lixl (Salzburg) (aus (Roser et al. 2011)): Übersichtsbild: Hinten rechts der 3D-Schlitten mit Schwenkarm und 3D-Gelenk und daran befestigtem mandibulo-maxillären Block. Links der Messarm mit Nadelmesskopf. Vorne rechts der Frontzahnführungsstift mit Inzisal- und Kinnpunktzeiger. Mittig die rechte Ramusschablone die an einem Messingkondylus (gold) aufgehängt und lose an den mandibulo-maxillären Block adaptiert ist. Die linke Ramusschablone ist auf dem Bild verdeckt. Detail rechts: Messingkondylus (gold) in dem dafür vorgesehenen Gehäuse (Fossa) von oben. Am roten Zeiger und der entsprechenden Skala lassen sich Rotationsbewegungen des Messingkondylus um die Vertikalachse ablesen.....17
- Abbildung 2.1: Eine Auswahl verschiedener Stereolithographiemodelle: Links oben: Modell des Mittelgesichts/Craniums und des Unterkiefers in Ausgangssituation. Rechts oben: Modell des Unterkiefers nach Osteotomie und Vorverlagerung. Links unten: Einzelmodelle nach Osteotomie der UK-Spange und der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (BSSO) von kranial. Rechts unten: Einzelmodelle nach Osteotomie des OK und UK in Okklusion als „mandibulo-maxillärer Block“ und die lateralen gelenktragenden Ramussegmente.23
- Abbildung 2.2: Der 3D-OSS von rechts nach Montage der Modelle in Ausgangsposition. In der Mitte sind der Ober- und Unterkiefer mittels Drahtligaturen zum mandibulo-maxillären Block verbunden und am 3D-Schlitten (rechts) durch den Schwenkarm und das 3D-Gelenk befestigt. Darüber der Nadelmesskopf, der mit dem Messarm (links) verbunden ist und mit der Registrierplatte Kontakt hat. Die lateralen gelenktragenden Ramussegmente sind über Messingkondylen im Artikulator montiert.....24
- Abbildung 2.3: Konfiguration des 3D-OSS nach vollständigem Einbau der Modelle von anterior. In der Mitte sind der Ober- und Unterkiefer mittels

MMF über Drahtligaturen zum mandibulo-maxillären Block verbunden und am 3D-Schlitten (rechts) durch den Schwenkarm und das 3D-Gelenk befestigt. Links der Messarm mit Nadelmesskopf.....	26
Abbildung 2.4: Darstellung des 3D-OSS von rechts: Inkrementellen Translation am Beispiel einer Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks in der Ansicht von lateral - Ausgangssituation „0 mm“. Ausschnitt oben rechts: gleiche Position des mandibulo-maxillären Blocks in der Ansicht von kranial auf das Millimeterpapier.....	27
Abbildung 2.5: Darstellung des 3D-OSS von rechts: Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 6 mm (roter Pfeil). Ausschnitt oben rechts: Vorverlagerung um 6 mm.	27
Abbildung 2.6: Darstellung des 3D-OSS von rechts: Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 12 mm (roter Pfeil). Ausschnitt oben rechts: Vorverlagerung um 12 mm	28
Abbildung 2.7: Selbst entwickelter Simulator für das CT mit montierten STL-Modellen (OK, interokklusaler Splint, UK und laterale gelenktragende Ramussegmente) von schräg vorne (oberes Bild) und von kranial (unteres Bild); Bodenplatte schwarz; Gerüst gelb; Verschiebetisch schwarz-silber mit Drehschraube schwarz-blau (untere) zur Verschiebung des Sockels; Millimetermaß türkis/weiß mit Zeiger darüber in blau (vgl. Ausschnitt oben rechts); Verbindungselemente zu den Kondylen rot.	30
Abbildung 2.8: Modellierende Abtragung anterior der vestibulären Kortikotomie (rote Kreise). Oben Areal vor Abtragung (Umriss gestrichelt); unten Areal nach Abtragung (rosarot eingefärbt) zur Nivellierung mit der lateralen Schnittfläche der UK-Spange.	32
Abbildung 2.9: Der Simulator mit montierten STL-Modellen (OK, interokklusaler Splint, UK und laterale gelenktragende Ramussegmente) in der „0 mm“ Ausgangsposition (links) und nach Vorverlagerung der UK-Spange um 12 mm (rechts) (roter Pfeil).	33
Abbildung 2.10: links: Lückenbildung zwischen der Unterkieferspange und den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten nach Vorverlagerung der UK-Spange 12mm; rechts: Freigabe der Kondylen (durch Entfernung der Verbindungselemente) und Anlagerung der lateralen gelenktragenden Ramussegmente an das mediale Segment.	34
Abbildung 2.11: Umwandlung der DICOM Daten in STL Oberflächendateien in der Software Invesalius 3.0: Links oben (coronal), rechts oben (sagittal) und links unten (axial) jeweils 2D Darstellung der Schichtbilder aus den Computertomographien. Rechts unten die von der Software daraus errechnete STL Oberflächendatei in 3D Darstellung.	35
Abbildung 2.12: Der Simulator in 3D Darstellung in der Software Geomagic Qualify 2012 in der „0 mm“ Ausgangsposition ohne Knochenlücken	36

- Abbildung 2.13 Darstellung des Simulators mit Lückenbildung nach 12 mm Vorverlagerung: Der Simulator und die eingebauten Modelle in blau. Die eigentlichen Knochenlücken wurden durch Verbindung korrespondierender Referenzpunkte zu 3D Körpern geformt, die eine Art „Ausguss“ der Knochenlücken darstellen (rot); links Ansicht von kranial; rechts Ansicht von schräg vorne.37
- Abbildung 2.14: Detailansicht des in Abbildung 2.13 in rot dargestellten 3D Körpers aus dem bony interface rechts.....37
- Abbildung 2.15: Arbeitsoberfläche und unterschiedliche Darstellungsebenen in VoXim: Es ist die gleichzeitige Betrachtung beziehungsweise Bearbeitung der Daten in coronaler (links oben), sagittaler (rechts oben) und axialer (links unten) Schichtung, sowie einer errechnete dreidimensionale Darstellung (rechts unten) möglich.39
- Abbildung 2.16: Darstellung der Bezugspunkte der lateralen gelenktragenden Ramussegmente: Bezugspunkte SAAL, SAAR, SAPL und SAPR aus Tabelle 2.2 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht. (Da die Punkte SAAL und SAPR in einer anderen Schicht als SAPL und SPAR liegen, sind sie in der axialen Darstellung nicht zu sehen). Beachte: Die abgebildeten Bezugspunkte in der 3D Ansicht gelten nur der Orientierung, da sie auch in einer „tieferen“ Schicht gelegen und von einer davor liegenden Struktur überlagert sein können.....41
- Abbildung 2.17: Darstellung der Bezugspunkte der Gelenkköpfchen: Bezugspunkte CLA, CLI, CRA und CRI aus Tabelle 2.3 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht. 43
- Abbildung 2.18: Darstellung der Bezugspunkte des medialen Segments: Bezugspunkte SIAL1, SIAL2 und SIAL3 aus Tabelle 2.4 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht. 45
- Abbildung 2.19: Darstellung der Bezugspunkte des medialen Segments: Bezugspunkte SIAR1, SIAR2 und SIAR3 aus Tabelle 2.4 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht.....46
- Abbildung 2.20: Darstellung der Bezugspunkte des medialen Segments: Bezugspunkte SIPL und SPIR aus Tabelle 2.4 in VoXim - oben die axiale CT Schicht und unten die 3D reformatierte Ansicht.....47
- Abbildung 2.21: Darstellung aller 16 definierten Bezugspunkte aus Tabelle 2.2 - Tabelle 2.4 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht. Auf den lateralen gelenktragenden Ramussegmenten befinden sich jeweils 4 Bezugspunkte (davon jeweils 2 auf den Kondylen) und 8 auf dem medialen Segment (die Beschriftungen sind teilweise überlagert). Beachte: Die abgebildeten Bezugspunkte in der 3D Ansicht gelten nur der Orientierung, da sie auch in einer „tieferen“ Schicht gelegen und von einer davor liegenden Struktur überlagert sein können.....48
- Abbildung 2.22: Darstellung der definierten Bezugsstrecken (in gelb) aus Tabelle 2.5 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht: An den Kondylen

- sind die jeweiligen Kondylenachsen und zwischen den Kondylen die „Interkondylardistanz“ innen und außen (mittige Markierung entspricht der Sagittalebene) zu erkennen. Im Osteotomiespalt sind die „Schnittlinien“ und die „Knochenlückenbreiten“ dazwischen dargestellt.....50
- Abbildung 2.23: Darstellung der definierten Bezugswinkel (in gelb) aus Tabelle 2.6 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht: Zwischen den Kondylenachsen ist der „Interkondylarwinkel“ zu erkennen (Bogen zwischen den Kondylenachsen, zur besseren Veranschaulichung mit einem Wert ($145,5^\circ$) beschriftet.). Im Osteotomiespalt sind die „Knochenlückenöffnungswinkel“ dargestellt (zur besseren Veranschaulichung mit Werten ($7,0^\circ$ rechts und $1,9^\circ$ links) beschriftet). Außerdem sind zwischen den Kondylen die „Interkondylardistanz“ und in den Osteotomiespalten die „Knochenlückenbreiten“ abgebildet.....51
- Abbildung 2.24: Darstellung der definierten Bezugsebenen/Bezugsflächen (in gelb) aus Tabelle 2.7 in VoXim in der 3D reformatierten Ansicht: rechts und links sind die „Schnittflächen“ zu erkennen, die Ebene in der Mitte entspricht der Sagittalebene (Ansicht leicht von rechts exzentrisch).52
- Abbildung 2.25: Automatische Berechnung und tabellarische Darstellung der Distanzen und Winkel in VoXim: Aus der Position im Koordinatensystem der Bezugspunkte (rot) werden die Längen der Strecken (gelb) und Größe der Winkel (blau) errechnet.55
- Abbildung 3.1: Darstellung des „condylar torques“ und der Lückenbildung im bony interface auf der rechten Seite bei Vorverlagerung im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Links 0 mm Vorverlagerung, rechts 12 mm Vorverlagerung. Die Vorverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Durch Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks (jeweils rechts im Bild) kommt es zur Kollision der Segmente am posterioren Rand der Anlagerungsfläche und zur Bildung einer Lücke zwischen den Segmenten im anterioren Bereich des Osteotomiespalt. Der „condylar torque“ lässt sich an der Maßeinteilung der Kondylengehäusen ablesen (gelbe Pfeile). Der grüne Pfeil veranschaulicht die Auswärtsdrehung der Kondylen um die Vertikalachse. (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).59
- Abbildung 3.2: Darstellung des „Lateralshifts“ nach Vorverlagerung um 12 mm im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Die Vorverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Ein Lückenschluss nach der Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks durch forciertes Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (veranschaulicht durch den unteren roten Pfeil) führt durch eine Kippung über einen punkt- oder linienförmigen Kollisionsbereich am dorsokranialen Rand der Anlagerungsfläche der Segmente (gestrichelte rote Linie) zu einem

- „Lateralshift“ der Kondylen (veranschaulicht durch den oberen roten Pfeil und, dem Betrag entsprechend, durch die gelben Pfeile). (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).60
- Abbildung 3.3: Darstellung der Lückenbildung auf der rechten Seite bei Rückverlagerung im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Links 0 mm Rückverlagerung, rechts 12 mm Rückverlagerung. Die Rückverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Durch Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks (jeweils rechts im Bild) kommt es zur Bildung einer Lücke zwischen den Segmenten am anterioren und posterioren Rand der Anlagerungsfläche der Segmente ohne Kollisionen der Segmente. Die Kondylenposition bleibt unverändert (gelbe Pfeile). (Fall 5 ME15-EJU-DUP).62
- Abbildung 3.4: Darstellung des „Medialshifts“ nach Rückverlagerung um 12 mm im 3D-OSS Versuch von kranial exzentrisch. Die Rückverlagerungsstrecke um 12 mm kann bei fixierter Nadel des Nadelmesskopfs am Millimeterpapier abgelesen werden (orangener Pfeil). Ein Schluss der durch Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks entstandenen Lücke durch Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente (veranschaulicht durch den unteren roten Pfeil) führt zu einem „Medialshift“ der Kondylen (veranschaulicht durch den roten Pfeil oben am Kondylengehäuse und, dem Betrag entsprechend, durch die gelben Pfeile). (Fall 5 ME15-EJU-DUP).63
- Abbildung 3.5: Exemplarische Übersicht der Umriss- & Größen der Knochenlücken bei zunehmenden Vorverlagerungsbeträgen des mandibulo-maxillären Blocks (hellgrün 4 mm, violett 8 mm, dunkelgrün 12 mm Vorverlagerung) in 3D Form. Die dargestellten 3D Körper stellen eine Art „Ausguss“ der Knochenlücken dar, wie in Abbildung 2.13 und 2.14 erläutert. a) rechts; b) links; (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).65
- Abbildung 3.6: Detailansicht (aus Abbildung 3.5) und Gegenüberstellung der Knochenlücken der rechten Seite bei Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 4 mm (links hellgrün) und um 12 mm (rechts dunkelgrün). Die Knochenlückenbreite nimmt bei größerer Vorverlagerung zu. Innerhalb der Knochenlücke nimmt die Breite von kranial posterior nach kaudal anterior zu und hat am anterioren Rand der Anlagerungsflächen die größte Breite. (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).66
- Abbildung 3.7: Überlagerung der 3D Formen aus Abbildung 3.5 (Knochenlücken der rechten Seite bei Vorverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks (hellgrün 4 mm, violett 8 mm, dunkelgrün 12 mm)). Es zeigt sich, dass mit zunehmender Verlagerung die Anlagerungsfläche in anteroposteriorer Richtung abnimmt (schwarze Pfeile). (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).67
- Abbildung 3.8: Schichtbreitenanalyse der Knochenlückenbreite rechts (in mm) bei 12 mm Vorverlagerung. Die Breite (in mediolateraler Richtung) der

- Knochenlücke wird in unterschiedlichen Farben (sog. „heat map“) dargestellt (siehe Skala rechts). Zunehmende Breiten von blau, über grün und gelb zu rot. Es ist erkennbar, dass die Breite von kranial posterior nach kaudal anterior zunimmt und am anterioren Rand der Anlagerungsflächen die größte Breite aufweist. (Fall 1 ME13-GIJ-GIX).....68
- Abbildung 3.9: Darstellung der Veränderung der Kondylenposition bei 12 mm Vorverlagerung (orangener Pfeil) als Gegenüberstellung der Ansichten aus a) Geomagic Qualify und b) dem 3D-OSS Versuch. a) blau: primäre Position vor Freigabe und Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente; rot: Position nach Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente. Es ist ein „Lateralshift“ der Kondylen zu erkennen. Außerdem ist eine Rotation um die Sagittalachse („roll“) des lateralen gelenktragenden Ramussegments nach außen erkennbar (schwarzer gekrümmter Pfeil). Der schmale rote Pfeil markiert die Knocheninterferenz. Kasten: Nahansicht des „Lateralshifts“ (bzw. der Kondylenüberlagerung). (Beachte: Der Oberkiefer wurde zur besseren Übersicht in dieser Ansicht entfernt). b) Zur Gegenüberstellung die entsprechende Abbildung aus dem 3D-OSS Versuch, die roten Pfeile weisen auf den „Lateralshift“ der Kondylen bei Adaptation des lateralen gelenktragenden Ramussegments hin. Die rot gestrichelte Linie markiert die Knocheninterferenz. (Fall 2 ME13-EXO-NEZ).....69
- Abbildung 3.10 Exemplarische Übersicht der Umrisse & Größen der Knochenlücken bei zunehmenden Rückverlagerungsbeträgen des mandibulo-maxillären Blocks (hellgrün 4 mm, violett 8 mm, dunkelgrün 12 mm Rückverlagerung) in 3D Form. Die dargestellten 3D Körper stellen eine Art „Ausguss“ der Knochenlücken dar, wie in Abbildung 2.13 und 2.14 erläutert. a) rechts; b) links; (Fall 5 ME15-EJU-DUP).....71
- Abbildung 3.11: Detailansicht (aus Abbildung 3.10) und Gegenüberstellung der Knochenlücken der rechten Seite bei Rückverlagerung des mandibulo-maxillären Blocks um 4 mm (links hellgrün) und um 12 mm (rechts dunkelgrün). Die Knochenlückenbreite nimmt bei größerer Rückverlagerung zu. Innerhalb der Knochenlücke ist die Breite am posterioren und anterioren Rand der Segmentanlagerungsflächen vergleichbar. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Verlagerung die Anlagerungsfläche in anteroposteriorer Richtung abnimmt (schwarze Pfeile). (Fall 5 ME15-EJU-DUP).72
- Abbildung 3.12: Schichtbreitenanalyse (sog. „heat map“) der Knochenlückenbreite rechts (in mm) bei 12 mm Rückverlagerung. Die Breite (in mediolateraler Richtung) der Knochenlücke wird in unterschiedlichen Farben dargestellt (siehe Skala rechts). Zunehmende Breiten von blau, über grün und gelb zu rot. Es ist erkennbar, dass innerhalb der Knochenlücke die Breite vom posterioren zum anterioren Rand der Segmentanlagerungsflächen konstant ist. (Fall 5 ME15-EJU-DUP).....73

- Abbildung 3.13: Darstellung der Veränderung der Kondylenposition bei 12 mm Rückverlagerung (orangener Pfeil) als Gegenüberstellung der Ansichten aus a) Geomagic Qualify und b) dem 3D-OSS Versuch. a) blau: primäre Position vor Freigabe und Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente; rot: Position nach Anlegen der lateralen gelenktragenden Ramussegmente. Es ist ein „Medialshift“ des lateralen gelenktragenden Ramussegments und somit der Kondylen zu erkennen (schwarzer Pfeil). Kasten: Nahansicht des „Medialshifts“ (bzw. der Kondylenüberlagerung). (Beachte: Der Oberkiefer wurde zur besseren Übersicht in dieser Ansicht entfernt). b) Zur Gegenüberstellung die entsprechende Abbildung aus dem 3D-OSS Versuch, die roten Pfeile weisen auf den „Medialshift“ der Kondylen bei Adaptation des lateralen gelenktragenden Ramussegments hin. (Fall 6 ME14-UTA-XOB)74
- Abbildung 3.14: Liniendiagramm - Knochenlückenöffnungswinkel der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils rechts und links: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenöffnungswinkel in Grad auf der y-Achse, rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 1 rot, Fall 2 grün, Fall 3 blau (Siehe Anhang Tabelle 1a).76
- Abbildung 3.15: Liniendiagramm - Knochenlückenöffnungswinkel der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils rechts und links: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenöffnungswinkel in Grad auf der y-Achse (beachte die unterschiedliche Skalierung zu Abbildung 3.14), rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 4 rot, Fall 5 grün, Fall 6 blau (Siehe Anhang Tabelle 1b).77
- Abbildung 3.16: Liniendiagramme - Knochenlückenbreiten am anterioren (linke Spalte der Diagrammreihen) und posterioren (rechte Spalte der Diagrammreihen) Rand der Anlagerungsflächen der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils rechts und links: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenbreite in mm auf der y-Achse, rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, rechte Seite rot, linke Seite grün (Siehe Anhang Tabellen 2a und 2b).79
- Abbildung 3.17: Liniendiagramme - Knochenlückenbreiten am anterioren (linke Spalte der Diagrammreihen) und posterioren (rechte Spalte der Diagrammreihen) Rand der Anlagerungsflächen der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils rechts und links: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Knochenlückenbreite in mm auf der y-Achse, rechte und linke Seite eines Falls in ähnlichem Farbton, rechte Seite rot, linke Seite grün (Siehe Anhang Tabellen 2c und 2d).....81
- Abbildung 3.18: Liniendiagramm - Interkondylarwinkel der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylarwinkel in Grad auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende

- Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 1 rot, Fall 2 grün, Fall 3 blau. (Siehe Anhang Tabelle 3a).....82
- Abbildung 3.19: Liniendiagramm - Interkondylarwinkel der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylarwinkel in Grad auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 4 rot, Fall 5 grün, Fall 6 blau. (Siehe Anhang Tabelle 3b).....83
- Abbildung 3.20: Liniendiagramm - Interkondylardistanzen der 3 Fälle mit Vorverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Vorverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylardistanz in mm auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 1 rot, Fall 2 grün, Fall 3 blau. (Siehe Anhang Tabelle 4a).....84
- Abbildung 3.21: Liniendiagramm - Interkondylardistanzen der 3 Fälle mit Rückverlagerung jeweils für angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente: Rückverlagerungsstrecke in mm auf der x-Achse, Interkondylardistanz in mm auf der y-Achse, angelegte und nicht angelegte laterale gelenktragende Ramussegmente eines Falls in ähnlichem Farbton, Fall 4 rot, Fall 5 grün, Fall 6 blau. (Siehe Anhang Tabelle 4b).....85
- Abbildung 4.1: Die linguale Zusatzostotomie nach Ellis (aus (Ellis 2007)): Kollision der Segmente bei BSSO nach Vorverlagerung der Unterkieferspange. Ansicht seitlich (A) und von oben (B). Durchführung der zusätzlichen Osteotomie am medialen Segment (C) und setzen einer Grünholzfraktur (D). Ansicht nach Einbringen des Osteosynthesematerials von der Seite (E) und von oben (F)... 114
- Abbildung 4.2: Die „posterior bending osteotomy“ nach (Yang und Hwang 2014a) im Rahmen einer Reoperation anhand eines virtuellen 3D-Modells. Dargestellt sind die bei einer bignathen Reosteotomie mit BSSO entstehenden Segmente: Der Oberkiefer (türkis), das mediale Segment (gelb), die lateralen gelenktragenden Ramussegmente (lila) und das durch die zusätzliche vertikale Osteotomie entstandene posteriore Segment (orange). Oben: Präoperative Ausgangssituation (Malokklusion, Fehlstellung und Deformationen nach vorangegangener bignather Umstellungsosteotomie, Osteosynthesematerial noch in situ). Unten links: Nach Reosteotomien und Verlagerung des Ober- und Unterkiefers kollidiert die linke dorsolaterale Fläche des medialen Segments mit der Medialfläche des gelenktragenden Ramussegments links. In der Planungssoftware sind diese beiden Segmente überlagert („Kollision“) dargestellt. Unten rechts: Das zusätzliche „posterior bending“ Segment nach vertikaler Zusatzosteotomie wird nach lingual gekippt, um die Knocheninterferenz auszugleichen. (aus Sammlung Prof. Cornelius). 115

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Alle in der Modellstudie untersuchten Fälle mit Fallnummern und Art der Dysgnathie (in Klammern), sortiert nach Verlagerungsrichtung..	22
Tabelle 2.2: Definition und Akronyme (in Klammern) der in der Software VoXim verwendeten Bezugspunkte der lateralen gelenktragenden Ramussegmente zur Vermessung des bony interface.....	40
Tabelle 2.3: Definition und Akronyme (in Klammern) der in der Software VoXim verwendeten Bezugspunkte der Gelenkköpfchen zur Vermessung des bony interface	42
Tabelle 2.4: Definition und Akronyme (in Klammern) der in der Software VoXim verwendeten Bezugspunkte des medialen Segments zur Vermessung des bony interface	44
Tabelle 2.5: Definition der in der Software VoXim verwendeten Bezugsstrecken zur Vermessung des bony interface.....	50
Tabelle 2.6: Definition der in der Software VoXim verwendeten Bezugswinkel zur Vermessung des bony interface	51
Tabelle 2.7: Definition der in der Software VoXim verwendeten Bezugsebenen/Bezugsflächen zur Vermessung des bony interface	52
Tabelle 3.1: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Vorverlagerung der Unterkieferspange im 3D-OSS Versuch. Das Verhalten war bei allen 3 Fällen identisch.....	57
Tabelle 3.2: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Rückverlagerung der Unterkieferspange im 3D-OSS Versuch. Das Verhalten war bei allen 3 Fällen identisch.....	61
Tabelle 3.3: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Vorverlagerung der Unterkieferspange im CT-Versuch.	65
Tabelle 3.4: Übersicht über das Verhalten des bony interface und der Kondylen bei inkrementeller Rückverlagerung der Unterkieferspange im CT-Versuch.	70

9. Anhang

Tabelle 1a: Knochenlückenöffnungswinkel bei inkrementell zunehmender Vorverlagerung

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 1 ME13-GIJ- GIX		Fall 2 ME13-OXO- NEZ		Fall 3 ME14-RUJ- ZOT	
	Winkel in ° rechts	Winkel in ° links	Winkel in ° rechts	Winkel in ° links	Winkel in ° rechts	Winkel in ° links
0	0,3	0,1	0,5	0,2	1,1	0,2
4	2,7	1,0	2,3	0,1	3,4	1,9
5	2,5	1,4	2,6	0,5	4,5	1,9
6	3,1	1,2	2,8	1,1	5,0	1,8
7	3,8	2,9	3,2	3,1	5,4	1,8
8	4,4	2,7	4,0	5,2	6,0	1,8
9	4,7	3,9	4,5	5,6	6,3	1,8
10	4,6	3,5	5,1	5,8	6,7	1,8
11	4,7	3,7	5,6	6,0	6,8	1,9
12	4,8	4,0	6,1	6,9	7,0	1,9

Tabelle 1b: Knochenlückenöffnungswinkel bei inkrementell zunehmender Rückverlagerung

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 4 ME14-XEK- TIQ		Fall 5 ME15-EJU- DUP		Fall 6 ME14-UTA- XOB	
	Winkel in ° rechts	Winkel in ° links	Winkel in ° rechts	Winkel in ° links	Winkel in ° rechts	Winkel in ° links
0	1,2	0,4	0,4	0,8	1,2	0,3
4	0,9	0,4	0,7	0,5	1,9	1,6
5	0,2	0,2	0,5	0,8	1,1	0,2
6	0,1	0,7	0,6	1,1	2,0	1,0
7	0,5	0,5	0,9	0,6	1,0	1,6
8	1,0	0,3	1,2	0,7	2,0	2,2
9	0,7	0,5	0,6	0,9	2,2	1,6
10	1,3	0,5	1,6	0,3	2,5	1,3
11	0,5	0,6	1,4	0,7	1,8	1,7
12	0,6	0,6	0,7	0,7	1,2	2,1

Tabelle 2a: Knochenlückenbreiten anterior bei inkrementell zunehmender Vorverlagerung

Fall 1 ME13-GIJ-GIX		
Verlagerungsstrecke in mm	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	anterior	anterior
0	0,9	1,0
4	3,4	1,9
5	3,1	2,0
6	3,1	2,0
7	3,5	2,5
8	3,9	2,6
9	4,0	3,1
10	3,8	3,1
11	4,1	3,3
12	4,5	3,4

Fall 2 ME13-EXO-NEZ		
Verlagerungsstrecke in mm	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	anterior	anterior
0	0,5	0,8
4	2,9	1,1
5	3,2	1,2
6	3,0	1,8
7	3,8	3,4
8	4,5	5,0
9	5,1	5,0
10	5,1	5,0
11	6,0	5,5
12	6,2	5,7

Fall 3 ME14-RUJ-ZOT		
Verlagerungsstrecke in mm	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	anterior	anterior
0	0,8	0,7
4	2,8	2,1
5	3,5	1,8
6	3,5	2,0
7	4,0	1,6
8	4,2	1,9
9	4,3	2,0
10	3,9	1,9
11	3,9	1,6
12	4,1	1,7

Tabelle 2b: Knochenlückenbreiten posterior bei inkrementell zunehmender Vorverlagerung

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 1 ME13-GIJ-GIX	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	posterior	posterior
0	0,1	0,5
4	1,5	1,7
5	0,5	1,1
6	0,6	1,0
7	0,9	0,9
8	0,9	0,2
9	0,2	0,1
10	0,0	0,4
11	0,7	0,8
12	0,0	0,2

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 2 ME13-EXO-NEZ	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	posterior	posterior
0	0,3	0,6
4	1,0	1,0
5	0,6	0,5
6	0,1	0,5
7	0,9	0,7
8	1,0	0,8
9	0,3	0,5
10	0,7	0,8
11	0,7	0,7
12	1,3	0,9

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 3 ME14-RUJ-ZOT	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	posterior	posterior
0	0,0	0,7
4	1,2	1,1
5	1,2	0,3
6	1,0	1,5
7	1,5	1,2
8	0,3	0,8
9	0,9	1,4
10	1,5	1,7
11	0,9	1,4
12	0,3	1,6

Tabelle 2c: Knochenlückenbreiten anterior bei inkrementell zunehmender Rückverlagerung

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 4 ME14-XEK-TIQ	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	anterior	anterior
0	1,0	1,5
4	1,1	1,3
5	1,7	1,7
6	1,5	1,5
7	1,6	2,0
8	1,5	1,6
9	2,1	1,8
10	2,0	2,1
11	2,4	2,1
12	2,3	2,0

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 5 ME15-EJU-DUP	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	anterior	anterior
0	1,3	1,7
4	2,3	2,2
5	2,3	2,2
6	2,4	2,5
7	2,7	2,6
8	2,5	2,2
9	2,7	2,7
10	3,3	2,9
11	3,4	2,8
12	3,2	3,2

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 6 ME14-UTA-XOB	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	anterior	anterior
0	0,6	0,6
4	1,3	1,7
5	1,3	1,4
6	1,3	1,5
7	2,0	1,6
8	2,3	1,6
9	1,9	1,6
10	2,7	1,7
11	2,1	1,7
12	2,8	1,8

Tabelle 2d: Knochenlückenbreiten posterior bei inkrementell zunehmender Rückverlagerung

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 4 ME14-XEK-TIQ	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	posterior	posterior
0	1,6	1,3
4	1,3	1,5
5	1,2	1,9
6	1,0	1,3
7	1,0	1,3
8	1,7	2,4
9	1,6	1,9
10	1,6	2,2
11	1,3	1,7
12	2,1	2,1

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 5 ME15-EJU-DUP	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	posterior	posterior
0	1,8	1,2
4	1,4	1,3
5	2,0	1,5
6	1,1	1,5
7	2,4	1,7
8	1,9	2,0
9	1,6	2,4
10	2,2	2,5
11	1,5	1,5
12	1,4	2,3

Verlagerungsstrecke in mm	Fall 6 ME14-UTA-XOB	
	Knochenlückenbreite in mm rechts	Knochenlückenbreite in mm links
	posterior	posterior
0	1,3	0,2
4	1,6	1,5
5	1,7	1,0
6	2,2	1,1
7	2,5	0,9
8	2,4	1,5
9	3,2	1,1
10	2,9	1,7
11	2,8	1,0
12	3,2	1,6

Tabelle 3a: Interkondylarwinkel bei inkrementell zunehmender Vorverlagerung

Verlagerungs- strecke in mm	Fall 1 ME13-GIJ-GIX		Fall 2 ME13-EXO-NEZ		Fall 3 ME14-RUJ-ZOT	
	Interkondylarwinkel in °		Interkondylarwinkel in °		Interkondylarwinkel in °	
	laterale Segmen- te nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt
0	152,0	151,1	161,3	161,6	131,8	131,7
4	156,6	151,0	163,1	161,2	138,4	131,4
5	157,0	151,5	164,8	160,8	141,5	131,6
6	156,9	152,0	165,8	160,7	142,1	131,4
7	157,1	151,8	166,8	160,5	142,5	131,5
8	158,5	151,7	167,6	160,9	143,5	131,9
9	159,0	151,1	168,1	160,7	144,0	131,6
10	158,3	152,4	168,8	160,4	144,4	131,5
11	159,0	151,1	169,3	160,8	145,0	131,7
12	159,4	152,3	170,0	160,7	145,5	131,8

Tabelle 3b: Interkondylarwinkel bei inkrementell zunehmender Rückverlagerung

Verlagerungs- strecke in mm	Fall 4 ME14-XEK-TIQ		Fall 5 ME15-EJU-DUP		Fall 6 ME14-UTA-XOB	
	Interkondylarwinkel in °		Interkondylarwinkel in °		Interkondylarwinkel in °	
	laterale Segmen- te nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt
0	162,6	162,8	144,7	144,7	148,0	147,5
4	161,7	162,4	144,3	144,3	146,7	147,0
5	162,6	162,3	143,9	144,1	147,2	147,5
6	161,6	162,6	144,2	144,0	147,7	147,3
7	162,0	162,4	143,9	144,2	147,0	147,3
8	161,7	162,5	144,1	144,0	147,7	147,2
9	161,2	161,7	144,8	144,9	147,3	147,3
10	161,8	161,8	144,1	144,5	147,1	147,8
11	162,8	161,4	144,1	144,2	147,2	147,6
12	161,7	162,5	144,6	144,8	147,7	147,2

Tabelle 4a: Interkondylardistanzen bei inkrementell zunehmender Vorverlagerung

Verlagerungs- strecke in mm	Fall 1 ME13-GIJ-GIX		Fall 2 ME13-OXO-NEZ		Fall 3 ME14-RUJ-ZOT	
	Interkondylardistanz in mm		Interkondylardistanz in mm		Interkondylardistanz in mm	
	laterale Segmen- te nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt
0	111,9	112,5	106,8	107,0	125,5	126,3
4	112,4	112,6	107,3	108,5	125,7	127,4
5	111,8	112,9	107,9	109,6	125,8	127,8
6	112,2	113,3	107,7	110,2	126,3	127,9
7	111,3	113,6	108,2	110,3	126,0	128,1
8	112,6	113,9	108,1	111,0	126,2	128,4
9	111,9	114,7	108,5	111,3	125,9	128,9
10	112,0	114,4	108,6	112,6	125,6	129,2
11	111,8	115,2	108,2	113,4	125,5	129,5
12	112,4	115,3	108,4	113,7	125,7	129,5

Tabelle 4b: Interkondylardistanzen bei inkrementell zunehmender Rückverlagerung

Verlagerungs- strecke in mm	Fall 4 ME14-XEK-TIQ		Fall 5 ME15-EJU-DUP		Fall 6 ME14-UTA-XOB	
	Interkondylardistanz in mm		Interkondylardistanz in mm		Interkondylardistanz in mm	
	laterale Segmen- te nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt	laterale Segmente nicht angelegt	laterale Segmente angelegt
0	126,6	126,9	116,6	116,3	110,1	110,7
4	126,7	126,1	116,6	115,8	110,2	110,1
5	126,8	125,9	116,0	115,4	110,3	109,9
6	126,8	125,6	116,3	115,6	110,5	109,5
7	126,7	125,2	116,3	115,0	110,5	109,3
8	126,7	124,8	116,7	114,3	110,4	108,8
9	127,0	125,0	116,2	114,4	110,5	108,8
10	126,7	124,6	116,3	113,9	110,6	108,0
11	126,8	124,1	116,1	113,5	110,3	107,9
12	126,9	123,6	116,8	113,7	110,6	107,1

10. Danksagung

Ich bedanke mich bei dem ärztlichen Direktor der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der LMU München Herrn Prof. Dr. Dr. M. Ehrenfeld für die Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Abteilung durchzuführen.

Vielen herzlichen Dank an Herrn G. Poetzel für die geduldige Hilfe bei der Fotodokumentation.

Ein großer Dank an Herrn Prof. Dr. Dr. M. Metzger für die Ermöglichung der Datenauswertung in Freiburg und der großen Unterstützung hierbei.

Herzlichen Dank an das CT Team der Klinik und Poliklinik für Radiologie der LMU München für die Hilfe und Nachsicht bei den teilweise stundenlangen CT Scans.

Mein großer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. J-F. Güth aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU für die große Hilfe und Unterstützung und das Bereitstellen der Analysesoftware.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern, meinen größten Vorbildern, deren unaufhörliche Unterstützung mir die Kraft gibt, mein Bestes zu geben.

Abschließend ein ganz besonderer Dank an meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. Carl-Peter Cornelius für die Überlassung des Themas, die stets freundliche Unterstützung, die hilfreichen Anregungen und Hilfestellungen und besonders die große Geduld im Laufe dieser Arbeit.

11. Eidesstattliche Versicherung

Weingart, Adrian

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Bony interface zwischen lateralen gelenktragenden und medialen Segmenten bei Vor- oder Rückverlagerungen des Unterkiefers nach bilateraler sagittaler Spaltungsosteotomie im Ramusbereich – Verhalten und Kontrollmöglichkeiten im Modellversuch

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 10.12.2020

Adrian Weingart